机电一体化系统设计

JIDIAN YITIHUA XITONG SHEJI

曾海峰　张立新／主编



机电一体化系统设计

曾海峰　张立新／主编

电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press
·成都·

图书在版编目（CIP）数据

机电一体化系统设计 / 曾海峰，张立新主编. 一成
都：电子科技大学出版社，2018.5

ISBN 978-7-5647-6119-6

Ⅰ. ①机… Ⅱ. ①曾… ②张… Ⅲ. ①机电一体化一
系统设计 Ⅳ. ① TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 079280 号

机电一体化系统设计

曾海峰　张立新　主编

策划编辑　罗　雅
责任编辑　罗国良

出版发行　电子科技大学出版社
　　　　　成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼　邮编　610051
主　　页　www.uestcp.com.cn
服务电话　028-83203399
邮购电话　028-83201495

印　　刷　成都市火炬印务有限公司
成品尺寸　185mm×260mm
印　　张　11.25
字　　数　260 千字
版　　次　2018 年 5 月第一版
印　　次　2018 年 5 月第一次印刷
书　　号　ISBN 978-7-5647-6119-6
定　　价　38.00 元

前　言

机电一体化是在微电子技术向机械工业渗透过程中逐渐形成并发展起来的一门新兴的综合性技术学科。目前，机电一体化技术正日益得到普遍重视和广泛应用，已成为现代技术、经济发展中不可缺少的一种高新技术。由于机电一体化技术的应用而生产出来的机电一体化产品，已遍及人们日常生活和国民经济的各个领域。为了在当今国际范围内剧烈的技术、经济竞争中占据优势，世界各国纷纷将机电一体化的研究和发展作为一项重要内容而列入本国的发展计划。

机电一体化是多学科领域综合交叉的技术密集型系统工程，所涉及的知识领域非常广泛，现代各种先进技术构成了机电一体化的技术基础。随着机电一体化技术的产生与发展，在世界范围内掀起了机电一体化热潮，它使机械产品向着高技术密集的方向发展。当前，以柔性自动化为主要特征的机电一体化技术发展迅速，水平越来越高。任何一个国家、地区、企业若不拥有这方面的人才、技术和生产手段，就不具备国际、国内竞争所必需的基础。要彻底改变目前我国机械工业面貌，缩小与国外先进国家的差距，必须走发展机电一体化技术之路，这也是当代机械工业发展的必然趋势。

本书共分七章。第1章概述了机电一体化的基本概念、典型机电一体化系统、关键技术、设计流程、设计办法；第2至第6章分别介绍了机械系统设计、接口设计、检测系统设计、伺服系统设计以及控制系统设计；第7章从系统整体的角度介绍了机电一体化总体设计的思想和方法。本书内容丰富，介绍深入浅出，既注意与先修课内容的衔接，又避免了相互重复，并将重点放在了实际应用上。

机电一体化是一门仍在不断向前发展的技术，相关应用也在日益深入。由于作者学识水平有限，加之时间仓促，书中难免存在疏漏不当之处，恳请广大读者批评指正。

编　者



目　录

第1章 概论

1.1 机电一体化基本概念

机电一体化是随着生产和技术的发展，在以机械、电子技术为主的多门技术学科相互渗透、相互结合过程中逐渐形成和发展起来的一门新兴边缘技术学科。机电一体化的英文名称是 Mechatronics，是由日本人通过截取英文机械学（Mechanics）的词头和电子学（Electronics）的词尾组合在一起而创造出来的一个新的英文名词。这一名词最早出现在1971年日本的《机械设计》杂志副刊上，后来随着机电一体化的发展而被广泛引用，目前已在世界范围内得到普遍承认和接受。

简单地讲，机电一体化是机械与电子技术有机结合的产物。机电一体化还处在不断发展和完善的过程中，到目前为止，国际上还没有统一的关于机电一体化的详尽解释。不同的个人、学术团体或工业企业部门，由于各自的出发点或着眼点不同，所作出的解释也不相同。日本机械振兴协会经济研究所在其"关于机械工业施政调查研究报告"中提出："机电一体化是指机械装置和电子设备适当地组合起来，构成机械产品或机电一体与机信一体的新趋势。"日经产业新闻把机电一体化称为"机械技术的机械学和电子技术的电子学组合起来的技术进步的总称"。日本富士通法纳克公司技术管理部长小岛利夫则认为："机电一体化是把机械学和电子学有机地结合起来，提供更加优越技术的一种技术。"尽管众说纷纭，却都强调了机械与电子有机结合的思想。

在国内，对于机电一体化的含义也有不同的理解，但由日本机械振兴协会经济研究所于1983年3月所做的解释被大家所普遍接受，即："机电一体化乃是在机械的主功能、动力功能、信息功能和控制功能上引进微电子技术，并将机械装置与电子装置用相关软件有机结合而构成系统的总称。"

机电一体化是一种崭新的学术思想，它除了强调机与电的有机结合，还具有更深刻、更广泛的含义。按照机电一体化思想，凡是由各种现代高新技术与机械和电子技术相互结合而形成的各种技术、产品（或系统）都应属于机电一体化范畴。因此，目前人们谈论的机电液（液压）一体化、机电光（光学）一体化、机电仪（仪器仪表）一体化以及机电信（信息）一体化等，实质上都可归结为机电一体化。

机电一体化是一个综合的概念，包含了技术和产品两方面内容。它首先是指机电一体化技术，其次是指机电一体化产品。机电一体化技术是指包括技术基础、技术原理在内的、使机电一体化产品得以实现、使用和发展的技术。机电一体化产品是指采用机电一体化技术，在机械产品基础上创造出来的新一代机电产品。

机电一体化技术是建立在机械技术、微电子技术、计算机和信息处理技术、自动控制技术、传感与测试技术、电力电子技术、伺服驱动技术、系统总体技术等现代高新技术群体基础之上的一种高新技术。机电一体化技术的突出特点在于它在机械产品中注入了过去所没有的新技术，把电子器件的信息处理和自动控制等功能“揉和”到机械装置中去，从而获得了过去单靠某一种技术而无法实现的功能和效果。机电一体化技术的重要实质是应用系统工程的观点和方法来分析和研究机电一体化产品或系统(以下统称为机电一体化产品)，综合运用各种现代高新技术进行产品的设计与开发，通过各种技术的有机结合，实现产品内部各组成部分的合理匹配和外部的整体效能最佳。

机电一体化产品是具有高技术含量的产品，其技术附加值随机电结合程度的加深而提高。图 1—1 反映了不同年代的产品技术附加值和技术构成比例的发展情况。可见，在当代产品中，单纯机械技术的附加值含量越来越少，而微电子技术的附加值含量却越来越多。随着时间的推进，这种趋势还将增加。但并不等于说，微电子技术可以脱离机械技术而在机械领域获得更大的经济效益，而是意味着，机械技术只有同微电子技术相结合，传统的机械产品只有向机电一体化产品方向发展，才是机械工业发展的唯一出路。

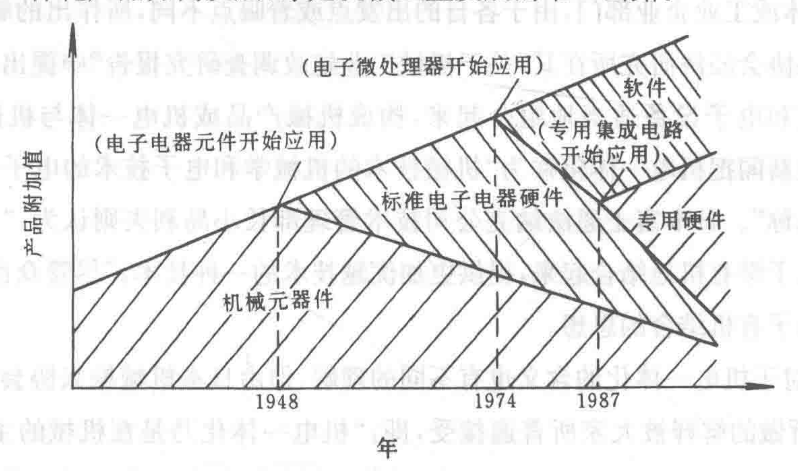


图 1—1　产品技术附加值与技术构成比例的发展情况

1.2　典型机电一体化系统

从传统的机电系统向机电一体化系统的过渡主要是依靠引用不断完善的控制技术加以实现的，其范围包括监控、开环控制、闭环控制、自适应控制、模糊控制以及智能控制等。但是控制技术和机电一体化技术两者之间存在着基本的区别，机电一体化伴随着机械系统的

再设计，机电一体化系统往往是将复杂的功能(如精密定位)由机械转移给电子，从而产生更加简单的机械系统。

根据机电一体化系统的定义概念，在工厂自动化中，典型的机电一体化系统有以下几种形式。

1.2.1　机械手关节伺服系统

图1－2是机械手的一个关节伺服系统，它的受控过程是机器人的关节运动。

伺服系统(Servosystem)又称为随动系统，它是一种反馈控制系统，它的受控变量是机械运动，如位置、速度及加速度。多数伺服系统用来控制运动机械的输出位置紧紧跟随电的输入参考信号。

关节伺服系统可采用微处理机作为控制器，关节轴的实际位置由旋转变压器测量，转换为电的数字信号后，反馈给微处理机控制器。微处理机经过控制算法运算后，输出控制指令，再经过数/模(D/A)转换和伺服功率放大，供给关节轴上的伺服电机。伺服电机根据控制指令驱动关节轴转动，直至机器人手爪到达输入参考信号设定的希望位置为止。

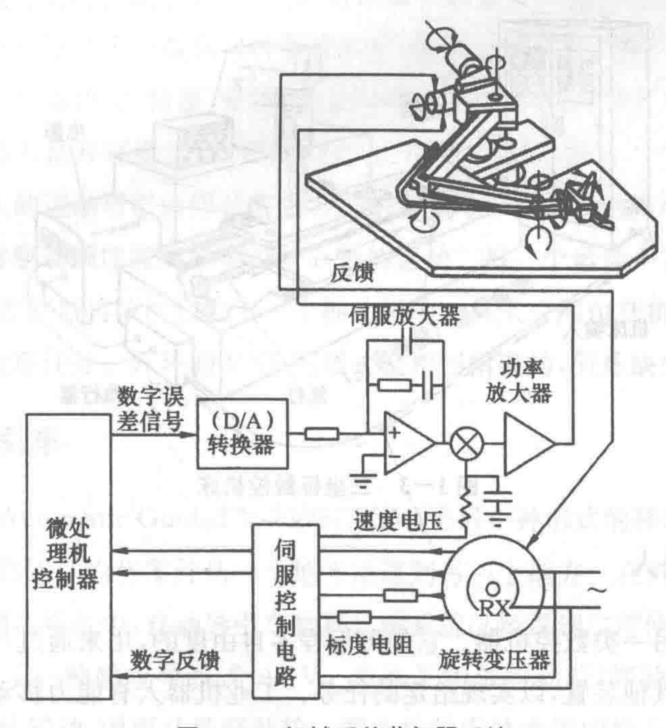


图1－2　机械手关节伺服系统

1.2.2　数控机床

通过数字控制(NC)系统控制加工过程的机床称为数控机床。数控系统是一种利用预先决定的指令控制一系列加工作业的系统。指令以数码的形式储存在某种形式的输入介质上，如磁带、磁卡等。指令确定位置、方向、速度以及切割速度等。零件程序包含加工零件所

要求的全部指令。数控机床可以形成镗、钻、磨、铣、冲、锯、车、铆、弯、焊以及特种加工等加工作业。

数控通过编制程序以替代原机械凸轮、模具及样板等，显示出柔性及机电一体化的优越性。同一数控机床采用不同的程序可以生产各种不同的零件。数控加工最适合在同一机床上加工大量不同的零件，而极少在同一机床上连续生产单一零件。当一个零件或一个加工过程能由数学定义的时候，数控是最理想的。随着计算机辅助设计(CAD)的应用日益增加，由数学定义的过程和产品越来越多。

图1—3表示了一种三坐标闭环数控机床。它利用闭环系统控制 x、y 及 z 三个坐标位置。x 位置控制器沿 x 方向水平移动工件。y 位置控制器沿 y 方向水平移动铣床头。z 位置控制器沿 z 方向垂直运动铣刀。图中，箭头表示改变 x 位置的信息传递过程。计算机转换符号程序为零件程序或者机器程序。零件或机器程序存储在磁带或磁卡上。数控机床操作人员将数据输进机床，并且监视操作。如果需要改变，必须编制新程序。现在，可以把程序储存在公共数据库内，按需要分配给数控机床。加工中心的图形终端容许操作人员评阅程序，必要时可以加以修改。

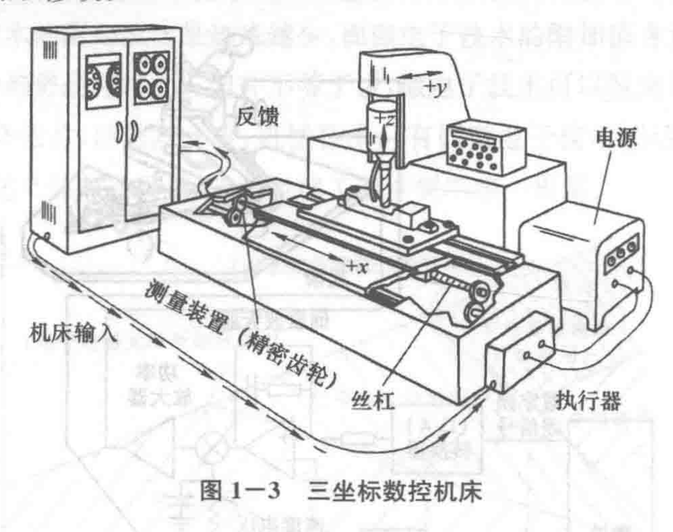


图1—3　三坐标数控机床

1.2.3　工业机器人

工业机器人是另一类数控机器。它是可编程多自由度的，用来通过一系列动作，搬运物料、零件、工具或者其他装置，以实现给定的任务。工业机器人有能力移动零件，加载数控机床，操作压铸机，装配产品，焊接、喷漆、打毛刺，以及包装产品。最典型的工业机器人是具有六自由度的机械手，如图1—4所示。



图1—4 六自由度工业机器人

每一个运动轴都有自己的执行器，连接到机械传动链，以实现关节运动。执行器最常用的是伺服电机，也可以是汽缸、气动马达、液压缸、液压马达或者步进电机。

气动执行器便宜、快速、清洁，但是气体可压缩性限制了它的精度和保持负载不动的能力。液压执行器能够驱动重负载和保持负载不动，但是价格昂贵、有噪声、比较慢，并且可能产生漏油。电动执行器快速、精密、安静，但是如果配减速器，其游隙会限制它的精度。

最简单的机器人是开环搬运(PNP)机器人。PNP机器人搬取一个物件并将它运到另一个地方。机器人的运动可以由限位开关、凸轮作用阀或者机械挡块控制的气动执行器实现。控制器以事件驱动顺序按时启动沿着一轴的运动。每一个运动一直继续到限位开关断开才停止。然后，控制器再依次启动下一个轴的运动。典型应用包括机床加载或卸载、堆垛以及一般的物料处理任务。开环的PNP机器人是相当精确的，但是缺少各个轴的协调。

1.2.4 自动导引车

自动导引车(Automatic Guided Vehicle，AGV)是另一种形式的移动工业机器人。它能够跟踪编程路径，在工厂内将零件从一个地方运送到另一个地方。在汽车工业、电子产品加工工业以及柔性制造系统中，自动导引车物料运输系统已经得到广泛使用。

图1—5表示了一种感应导线式AGV。该车采用单驱动轮/驾驶机构，即前轮为驱动轮，它能够绕驾驶轴转动，因而又是驾驶轮。两个后轮安装在固定轴上，允许沿车身纵轴方向滚动。

1.2.5 顺序控制系统

顺序控制系统是按照预先规定的次序完成一系列操作的系统。在顺序控制系统中，每一步操作是一个简单的二进制动作，如电源开关的通断或制造设备专用控制器的启停站等。

实现顺序控制功能可有多种手段，如继电器逻辑、集成电路、通用微型计算机等。

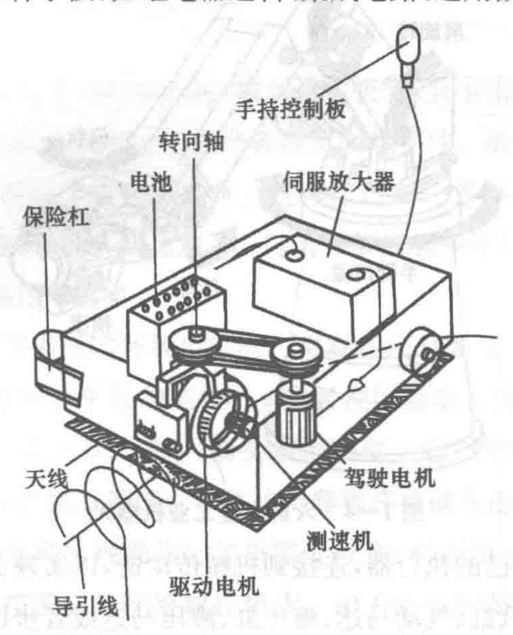


图 1—5 感应导线式自动导引车

当前，普遍采用可编程序逻辑控制器(Pro-gramming Logical Controller，PLC)作为顺序控制器。PLC 具有足够数量的输入/输出(I/O)端口，带有专用的逻辑编程语言，还有通信接口，与制造设备和系统连接十分方便，因而实际使用非常广泛。

根据如何开始和终结操作，顺序控制可以分为两类：①当某一事件发生时，开始或结束操作的称为事件驱动顺序控制；②在某一时刻或一定时间间隔之后，开始或结束操作的称为时间驱动顺序控制。自动洗衣机是最常见的时间驱动顺序控制的实例。洗衣周期以某一操作开始，当某人按压启动按钮时，注水操作开始，直到洗衣桶灌水到设定值时结束。而后，剩下的所有操作都是按计时器开始和结束的。这些操作包括洗衣、放水、漂清以及甩干等全部操作过程。多数批处理控制系统都是属于时间驱动顺序控制系统。时间驱动顺序控制系统由示意图和定时图描写。示意图表示物理方案，而定时图定义顺序操作。

制造工业存在大量事件驱动顺序控制系统。描写事件驱动顺序控制逻辑常用的是梯形图和布尔代数方程。梯形图中最常用的元件是开关、触点、继电器、接触器、马达起动器、延时继电器、气动电磁阀、汽缸、液压电磁阀以及液压缸等。

图 1—6 表示了一个自动加工过程的事件驱动顺序控制系统。它由供料和卸料传送带、上料和下料机器人、加工机床、自动装配机以及编码转台等制造设备组成。这些制造设备都与可编程序逻辑控制器(PLC)相连，进行 I/O 信息交换。PLC 根据各个输入、输出状态，通过逻辑运算，决定各个输出状态的变化，控制相应设备的启停，从而实现制造过程的自动化。

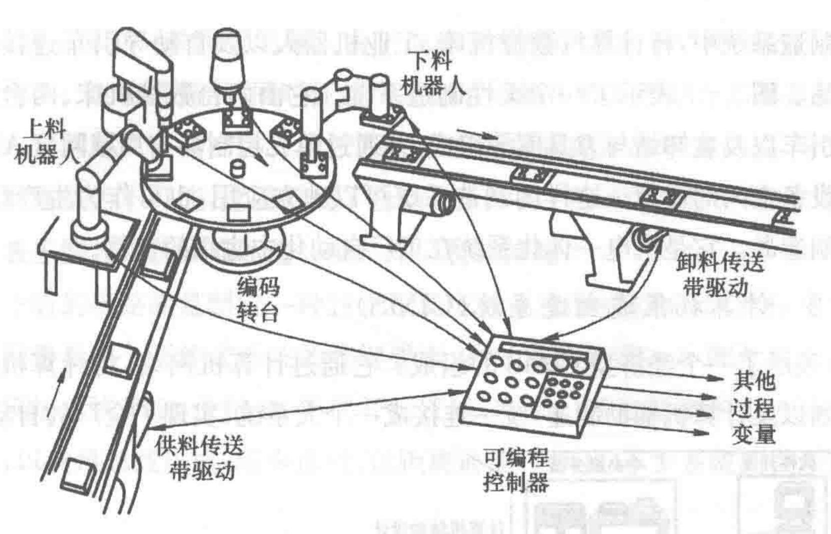


图 1—6 加工过程顺序控制系统

1.2.6 数控自动化制造系统

在制造工业中，要求生产系统有能力适应不断变化的市场，以很短的周期生产出各种形式的小批量新产品。不管是手工生产，或者是大批量生产线，都是不能满足这些要求的。前者虽然适应性强，但是生产率低；后者固有的装配与传送线缺少柔性，改变起来耗费时间和代价。这种在制造过程中增加柔性的要求，必然导致柔性制造系统概念的发展。

1.2.6.1 柔性制造系统(FMS)

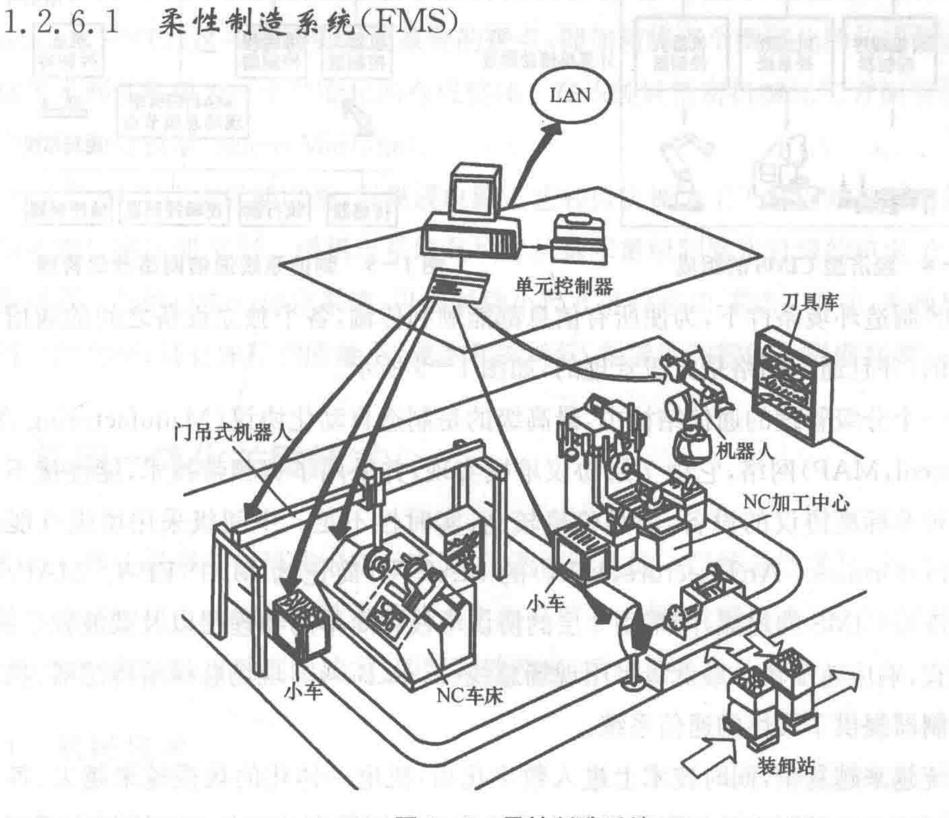


图 1—7 柔性制造系统

在柔性制造系统中，将计算机数控机床、工业机器人以及自动导引车连接起来，以适应加工成组产品。图 1－7 表示了一个柔性制造系统。它由两台数控机床、两台工业机器人、三辆自动导引车以及装卸站与刀具库等组成，并通过单元控制器与局域网(LAN)相连，以实现各个独立设备之间的通信。这样的制造系统可以独立应用，也可作为生产线中的一个独立的自动化制造岛。它是机电一体化系统在工厂自动化中应用的范例。

1.2.6.2 计算机集成制造系统(CIMS)

图 1－8 表示了一个经济型 CIMS 的组成。它通过计算机网络，将计算机辅助设计、计算机辅助规划以及计算机辅助制造，统一连接成一个大系统，实现了全厂的自动化。

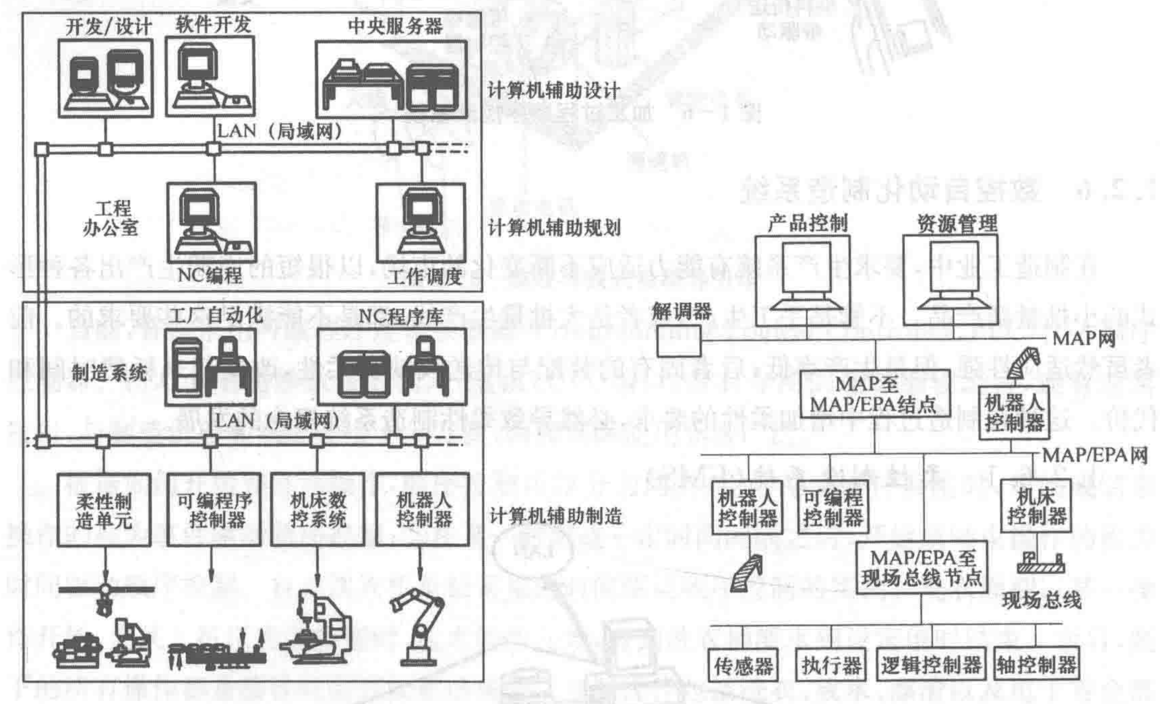


图 1－8 经济型 CIMS 的组成　　图 1－9 制造系统通信网络分级管理

在 CIMS 制造环境条件下，为使所有信息都能顺利传输，各个独立设备之间的通信是由局域网实现的，并且通信网络是分级管理的，如图 1－9 所示。

在这样一个分级管理的通信结构中，最高级的是制造自动化协议(Manufacturing Automation Protocol，MAP)网络，它由 7 层协议堆栈实现，并采用了宽频带技术，能连接不同厂商提供的各种非标准协议的设备，但是价格较高、实时性不足。中间级采用增强性能结构(Enhanced Performance Architecture，EPA)的 MAP 网，简记为 MAP/EPA。MAP/EPA(图 1－9 经济型 CIMS 的组成)网采用 3 层的协议堆栈和简单的物理层以及载波频带技术，因此价格便宜，响应速度快。最低级采用现场总线(Field Bus)。现场总线给传感器、执行器以及底层控制器提供了柔性的通信系统。

随着系统越来越复杂，同时技术上进入数字化后，机电一体化的规模越来越大，各厂家便开始独立创建相互关联产品相互连接的专有协议。不同厂家的产品由于协议不同而缺乏

互操作性,这样就出现了一系列新问题。由于很难有单独厂家能不依赖别的厂家提供所有产品来满足应用工厂的全部需求,同时任何厂家都不可能在所有产品方面都是最好的,因此常常需要选择一些其他厂家的产品。由于不同厂家设备采用不兼容的协议,导致将各个部分集成于同一网络成为不可能,这就形成了自动化生产的一个个"孤岛"。由于协议的不同,造成了现场仪表不能与系统集成而进一步发挥仪表的智能。

解决以上矛盾的出路就是制定一种独立于卖方的系统集成标准,因此标准化的总线网络顺势而生。网络是一个开放式系统的关键要素,在此基础上进一步开发出具有互操作性的现场总线。现场总线于20世纪80年代开始发展,专家们开发新技术作为标准的国际通行的现场总线,以满足总线供电、安全运行、远距离通信等要求,不少系统的供应商都参加了标准的开发。

1.2.7 微机电系统

机电一体化在微型化领域的发展产生了微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems,MEMS)。关于微机电系统一个较普遍的定义为:"微机电系统是电子和机械元件相结合的微装置或系统,采用与集成电路(IC)兼容的批加工技术制造,尺寸可从毫米量级到微米量级范围内变化。这些系统结合了传感和执行功能并进行运算处理,改变了我们感知和控制物理世界的方式。"这一新的领域在欧洲多称为微系统技术(Micro-Systems-Technology,MST),这一称谓更强调系统的观点,即如何将多个微型化的传感器、执行器、处理电路等元部件集成为一个智能化的有机整体。在该领域精密机械加工方面有传统优势的日本则之称为微机器(Micro-Machine)。

20世纪80年代中后期以来,以集成电路工艺和微机械加工工艺为基础制造的微机电系统平均年增长率达到30%。微机电系统是尺寸从毫米量级到微米量级的将电子元件和机械元件集成到一起的机电一体化系统,可以对微小尺寸进行感知、控制、驱动,单独地或配合地完成特定的功能;具有体积和质量小、成本和能耗低、集成度和智能化程度高等一系列特点。

1.3 机电一体化关键技术

机电一体化是多种学科技术相互交叉、渗透而形成的一门综合性学科,所涉及的领域非常广泛。概括说机电一体化共性关键技术主要有下述六项:机械技术、计算机与信息处理技术、检测与传感技术、自动控制技术、伺服驱动技术、系统总体设计技术。

1.3.1 机械技术

机电一体化系统的主功能、构造功能主要靠机械技术实现,因此机械技术是机电一体化

的基础。相对于传统的机械技术，机电一体化对机械技术提出了更高的要求。随着新材料、新工艺、新原理、新机构等的不断出现，现代设计与制造方法的不断发展完善，机械技术的着眼点在于如何与机电一体化技术相适应，利用其他高新技术来更新概念，实现结构上、材料上、性能上的变更，满足减轻重量、缩小体积、提高精度和刚度、改善性能等多方面的要求。例如，对结构进行优化设计，采用新型复合材料，在减轻机械本体的重量、缩小体积、减小惯性的同时，又保证了必要的机械强度和静、动刚度；开发高精度导轨、轴承、齿轮以及精密滚珠丝杠等，提高关键部件的精度和可靠性；研究新型传动机构和减速器，减小传动误差、提高传动效率等。

机械技术的核心是考虑力作用下物体的特性。机械系统按性质可分为刚性的、可变形的(柔性的)和可流动的(液体)。刚体系统假定系统中所有的物体和连接都是完全刚性的。在实际系统中，完全刚性的系统是不存在的，当施加各种各样的载荷时，总会有一些变形。变形很微小不至于影响系统的运动特性时，可视为刚体系统。当变形较大，尤其是出现材料失效特性时，系统的柔性不可忽略。大多数机电一体化系统都可近似为刚体系统。近年来，随着非金属复合材料、新型驱动器、仿生机械等新兴技术的发展与应用，越来越多的刚柔混合机械系统向经典的机械设计理论提出了挑战，推动了多刚体和刚柔混合机械系统的分析理论与仿真设计方法的发展。为了使机电一体化产品安全可靠地工作，其结构系统必须具有良好的静、动态特性，为此，必须对其进行动态分析与动态设计，以满足机械结构静态、动态特性的要求。针对不同的性能要求与使用环境，从静强度、静刚度设计到动强度、动刚度设计，从单元零部件可靠性分析到整机系统的可靠性研究，以及机械结构的损伤容限设计、动力优化设计、低噪声设计、抗磨防蚀设计等，机电一体化产品的机械设计内容与方法在不断拓展和发展中。

1.3.2 计算机与信息处理技术

信息处理技术包括信息的交换、存取、运算、判断和决策等，实现信息处理的主要工具是计算机。计算机技术包括计算机硬件技术和软件技术、网络与通信技术、数据库技术等。在机电一体化系统中计算机与信息处理装置相当于人的大脑，指挥整个系统的运行。基于微电子技术和计算机技术的信息处理技术是使机电一体化产品具有自动化、数字化和智能化的关键所在，也是促进机电一体化技术和产品发展最活跃的因素。近年来备受关注的人工智能技术、专家系统技术、神经网络技术等均属于计算机信息处理技术。

机电一体化系统中常用的计算机与信息处理装置包括微型计算机、单片机、可编程序控制器 PLC、数字信号处理器 DSP 和其他与之配套的输入/输出器件、显示器、存储芯片等。信息处理是否正确、及时，直接影响到机电一体化系统的工作质量和效率。因此，提高信息处理的速度，如采用小型大容量高速处理计算机或高速小功率运算部件；提高系统的可靠

性，如采用自诊断、自恢复和容错技术；提高智能化程度，如采用人工智能技术、专家系统和神经网络技术等，都是机电一体化中信息处理技术的发展方向。

1.3.3 检测与传感技术

检测与传感技术的研究对象是传感器及其信号检测装置。机电一体化系统中，传感器作为感受器官，将系统各种内外信息通过相应的信号检测装置反馈给控制及信息处理装置。传感器可用来监测过程或系统中的一个或多个变量，评价设备的运行和健康状况，检查工作的进展情况，以及确认零部件和工具。检测与传感是实现自动控制的关键环节，其功能越强，系统的自动化程度就越高。例如，刀具磨损是影响加工中心的加工质量与效率的一个重要因素，研究刀具磨损检测系统，对机床的安全运行与提高加工质量有重要意义。刀具磨损情况可利用多维力传感器或声发射传感器来检测，当由于刀具磨损而引起负荷转矩增大并超过允许值时，检测系统将发出警示信号，提醒控制系统发出换刀机械手的操作指令。

机电一体化系统中使用的传感器种类很多，最常测量的一些变量是位置、速度、力、扭矩、加速度、温度、流量、声音、光度等。在测量这些变量时，传感器本身的动态特性、稳定性、分辨率、精度、鲁棒性、尺寸及信号处理等性能指标是很重要的。其中精度、灵敏度和可重复性是传感器的关键性能，而可重复性与传感器的可靠性和抗干扰能力有直接关系。现代工程要求传感器能快速、精确地获取信息并能经受严酷环境的考验，它是机电一体化系统达到高水平的保证。

随着微电子、新材料和传感技术的发展，集成化与智能化成为传感器发展趋势。例如，集成了压力、压差和温度于一体的多功能集成传感器，采用微细加工技术 MEMS 制作微型传感器，采用厚膜和薄膜技术制作新型传感器，带微处理器的具有判断能力、学习能力的智能传感器，以及各种模拟人的感觉器官的生物传感器等。从构成上看，智能式传感器是一个典型的以微处理器为核心的计算机检测系统。同一般传感器相比，智能式传感器具有信息处理和可编程能力，因此不但可感知信息而且可处理信息，还可通过算法软件修正各种确定性系统误差、适当地补偿随机误差，进行自诊断、自校准和数据存储，具有精度高、稳定可靠性好、检测与处理方便、功能广和性价比高的显著特点。

1.3.4 自动控制技术

自动控制技术是能够在没有人直接参与的情况下，利用附加装置（自动控制装置）使生产过程或生产机械（被控对象）自动地按照某种规律（控制目标）运行，使被控对象的一个或几个物理量（如温度、压力、流量、位移和转速等）或加工工艺按照预定要求变化的技术。它以自动控制理论为基础，以电子技术、电力电子技术、传感器技术、计算机技术、网络与通信技术为主要工具，实现机电一体化产品的自动化。由于微型计算机的广泛应用，自动控制技

术越来越多地与计算机控制技术联系在一起，成为机电一体化中十分重要的关键技术。

自动控制技术范围很广，包括自动控制理论、控制系统设计、系统仿真、现场调试、可靠运行等理论到实践的整个过程。自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。初期，是以反馈理论为基础的自动调节原理，主要用于工业控制，逐步形成以传递函数为基础的经典控制理论，主要研究单输入一单输出、线性定常数系统的分析和设计。PID控制规律是古典控制理论最辉煌的成果之一。由于实际系统往往存在复杂性、非线性、时变性、不确定性等情况，为了解决其精确建模的难题，自动控制领域从古典控制理论、现代控制理论到现在的智能控制理论，经历了很长时间的发展。自动控制技术有很强的应用背景，如何巧妙地运用控制的基础理论来解决实际问题是和研究控制理论本身不同的另一种创造性工作。机电一体化系统中自动控制技术的难点在于自动控制理论的工程化与实用化，这是由于现实世界中的被控对象往往与理论上的控制模型之间存在较大差距，使得从控制设计到控制实施往往要经过反复调试与修改，才能获得比较满意的结果。

由于被控对象种类繁多，所以机电一体化系统中的自动控制技术内容十分丰富，包括高精度定位控制、速度控制、自适应控制、自诊断、校正、补偿、示教再现、检索等控制技术。近年来自动控制技术发展迅猛，特别是计算机技术、网络和通信技术发展的突飞猛进，使人们借助于许多使能技术的进步和一些开发工具的扩大，将人们构思的自动操作付诸实现。如网络控制技术、可编程控制器等均属于自动化控制技术中的使能技术。随着控制对象的复杂性和控制性能要求的不断提高，自动控制技术正向着网络化、集成化、分布化、节点节能化、智能化的方向发展。

1.3.5 伺服驱动技术

伺服驱动技术的研究对象是执行元件及其驱动装置，其中执行元件有电动、气动、液压等多种类型。机电一体化产品中多采用各种电动机，其驱动装置即驱动电源电路，目前多数采用电力电子器件及集成化功能电路。执行元件一方面通过电气接口向上与计算机相连，以接收计算机的控制指令；另一方面又通过机械接口向下与机械传动和执行机构相连，以实现规定的动作。由执行元件、驱动装置和传动机构组成的伺服系统，是实现电信号到机械动作的转换装置与部件，其作用是使输出的机械位移（或转角）准确地跟踪输入的位移（或转角）指令，对系统的动态性能、控制质量和功能有决定性的影响。高性能的伺服系统可以提供灵活、方便、准确、快速的驱动，从而完美地实现机电设备的高效自动化。因此，伺服驱动技术是机电一体化的一种关键技术，在机电一体化系统或产品中具有重要的地位，在国内外受到普遍关注。

高性能伺服驱动系统涉及的关键技术包括伺服电动机技术、伺服驱动器技术、伺服控制技术和接口技术。因此，伺服驱动技术的发展与磁性材料技术、半导体技术、通信技术、组装

技术、生产工艺水平等基础工业技术的发展密切相关。微处理器(特别是数字信号处理器——DSP)技术、电力电子技术、网络技术、控制技术的发展为伺服驱动技术的进一步发展奠定了良好的基础。精准的驱动效果和智能化的运动控制成为伺服发展的重要指标。20世纪80年代以来交流伺服驱动技术日趋完善并不断扩大应用领域,直流伺服驱动技术和步进电动机技术有了新的发展,超声电动机和直线电动机等一系列新型伺服电动机因其特有的高性能而为人们所关注和研究。此外,气动伺服技术、电液比例技术以及新型液压驱动技术等都在当今机械工业自动化技术中发挥着特殊作用。随着技术的进步和整个工业的不断发展,伺服驱动技术和伺服驱动系统已进入全数字化和交流化的时代,并向着智能化、网络化的方向发展。

1.3.6 系统总体技术

机电一体化技术涉及多学科领域,它不是几种技术的简单叠加,而是通过系统总体设计使它们形成一个有机整体。对于由多个功能要素组成的机电一体化系统而言,即使各个组成要素的性能和可靠性很好,但如果整个系统不能很好的协调,系统也很难正常运行。系统总体技术就是按照系统工程的观点和方法,以整体的概念组织应用各种相关技术,从全局角度和系统目标出发,将系统总体分解成相互有机联系的若干功能单元,并以功能单元为子系统继续分解,直至找到可实现的技术方案,然后再把功能和技术方案组合成方案组进行分析、评价和优选。机电一体化总体技术是一种设计哲学,一种工程设计的集成方法。它解决的是系统性能优化问题和组成要素之间的有机联系问题。

系统总体技术包含的内容很多,接口技术是其重要内容之一。机电一体化产品的多功能单元通过接口连接成一个有机的整体。各种功能模块之间的接口问题,已成为构成机电一体化系统的关键问题。硬件(部件)和软件(信息处理)的集成是实现系统各功能模块集成的一种有效手段。硬件集成源于将机电一体化系统看作一个整体系统来设计,将传感器、执行元件和微处理器融入机械系统中。软件集成主要是基于高级控制功能,将过程知识、信息处理和反馈控制包含其中。系统总体技术是最能体现机电一体化设计特点的技术,其原理和方法还在不断发展和完善中。

1.4 机电一体化系统的评价及设计流程

1.4.1 机电一体化系统的评价

机电一体化的目的是提高系统(产品)的附加价值,所以附加价值就成了机电一体化系统设计与应用机电一体化系统(产品)的综合评价指标。机电一体化系统(产品)内部功能的

主要评价内容如图1—10所示。如果系统(产品)的目的功能未定,那么其具体的评价项目也不好定,此时系统(产品)的高性能化就成为主要评价项目。高可靠性化和低价格化当然是对系统(产品)整体而言的。

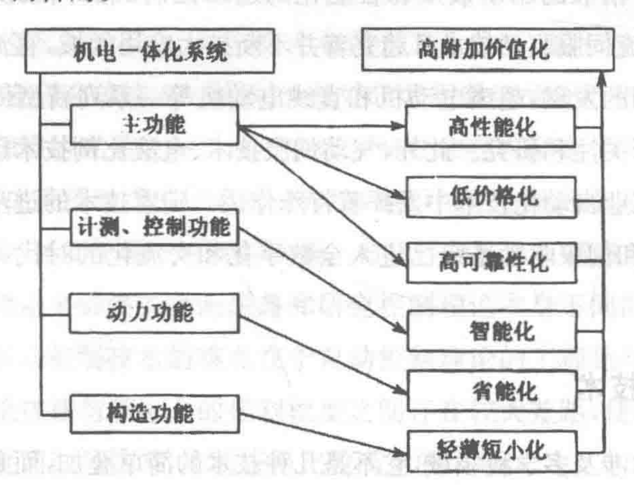


图1—10 机电一体化系统(产品)的评价内容

机电一体化系统(产品)的一大特点是由于机电一体化系统(产品)的微电子装置取代了人对机械的绝大部分的控制功能,并加以延伸和扩大,克服了人体能力的不足和弱点。另一大特点是节省能源和材料消耗。这些特点正是实现机电一体化系统(产品)高性能化、智能化、省能省资源化及轻薄短小化的重要原因,也正是对工业三大要素(物质、能量和信息)的具体贡献。如图1—11所示,机电一体化的三大效果是与我国工业发展方向相一致的,也是我国机电一体化技术革命发展的重要原因。

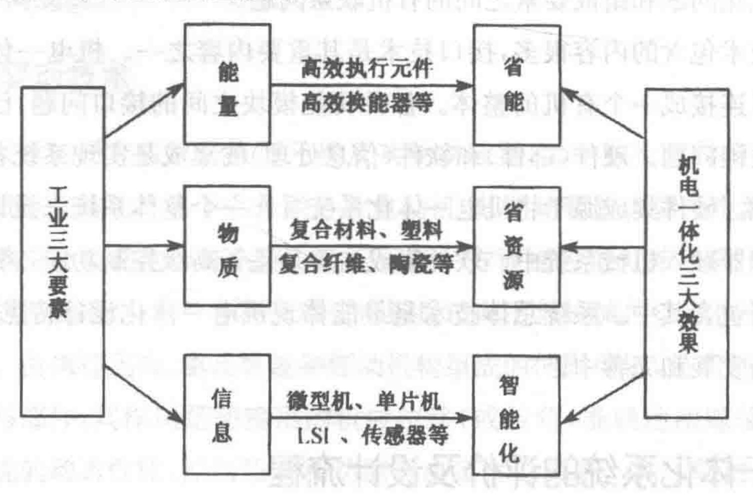


图1—11 工业三大要素与机电一体化的三大效果

1.4.2 机电一体化系统的设计流程

机电一体化系统(以工作机为主)的设计流程如图1—12所示。

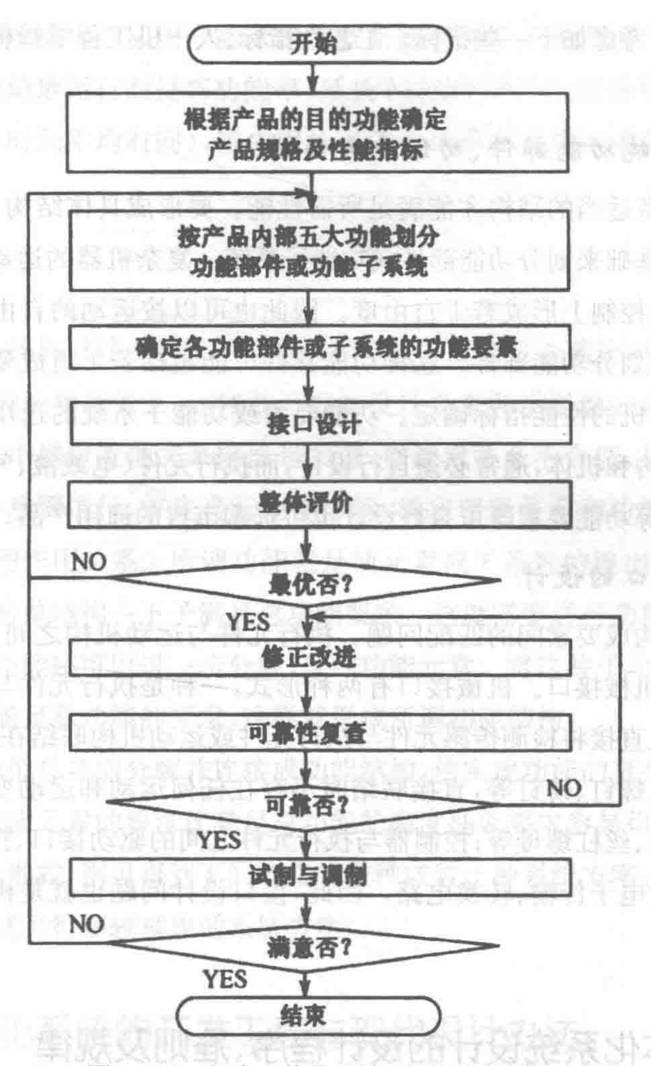


图1—12 机电一体化系统（产品）设计流程

1.4.2.1 根据目的功能确定产品规格、性能指标

工作机的目的功能，不外乎是用来改变物质的形状、状态、位置尺寸或特性，归根到底必须实现一定的运动，并提供必要的动力。其基本性能指标主要是指实现运动的自由度数、轨迹、行程、精度、速度、动力、稳定性和自动化程度。用来评价机电一体化产品或系统质量的基本指标，是那些为了满足使用机电一体化系统设计与应用要求而必须具备的输出参数。

运动参数——用来表征机器工作运动的轨迹、行程、方向和起止点位置正确性的指标。

动力参数——用来表征机器输出动力大小的指标，如力、力矩和功率等。

品质指标——用来表征运动参数和动力参数品质的指标，例如运动轨迹和行程的精度（如重复定位精度），运动行程和方向的可变性，运动速度的高低与稳定性，力和力矩的可调性或恒定性等。

以上基本性能指标通常要根据工作对象的性质和用户要求，有时还要通过实验研究才能确定。因此，要以能够满足用户使用要求为度，不需要追求过高的要求，在满足基本性能

指标的前提下，还要考虑如下一些指标。工艺性指标、人一机工程学指标、美学指标、标准化指标等。

1.4.2.2 **系统功能部件、功能要素的划分**

工作机必须具备适当的结构才能满足所需性能。要形成具体结构，要以各构成要素及要素之间的接口为基础来划分功能部件或功能子系统。复杂机器的运动常由若干直线或回转运动组合而成，在控制上形成若干自由度。因此也可以按运动的自由度划分成若干功能子系统，再按子系统划分功能部件。这种功能部件可能包括若干组成要素。各功能部件的规格要求，可根据整机的性能指标确定。功能要素或功能子系统的选用或设计是指特定机器的操作(执行)机构和机体，通常必须自行设计，而执行元件(电或液、气等驱动元件)、检测传感元件和控制器等功能要素既可自行设计也可选购市售的通用产品。

1.4.2.3 **接口的设计**

接口问题是各构成要素间的匹配问题。执行元件与运动机构之间、检测传感元件与运动机构之间通常是机械接口。机械接口有两种形式，一种是执行元件与运动机构之间的联轴器和传动轴，以及直接将检测传感元件与执行元件或运动机构联结在一起的联轴器(如波纹管、十字接头等)、螺钉、铆钉等，直接联结时不存在任何运动和运动变换。另一种是机械传动机构，如减速器、丝杠螺母等；控制器与执行元件之间的驱动接口、控制器与检测传感元件之间转换接口，微电子传输、转换电路。因此，接口设计问题也就是机械技术和微电子技术的具体应用问题。

1.5 机电一体化系统设计的设计程序、准则及规律

1.5.1 设计程序

设计中一般采用三阶段法，即总体设计、部件(零件)的选择与设计或初步设计、技术设计与工艺设计。在试验性设计与计算机辅助设计中，多采用既分阶段又平行兼顾的设计即并行设计，以便相立协调。总体设计程序为：明确设计思想→分析综合要求→划分功能模块→决定性能参数→调研类似产品→拟定总体方案→方案对比定型→编写总体设计论证书。

1.5.2 设计准则

设计准则主要考虑“人、机、材料、成本”等因素，而产品的可靠性、适用性与完善性设计最终可归结于在保证目的功能要求与适当寿命的前提下不断降低成本。以降低成本为核心的设计准则不胜枚举。产品成本的高低，70%决定于设计阶段，因此，在设计阶段可从新产品和现有产品改型两方面采取措施，一是从用户需求出发降低使用成本，二是从制造厂的立

场出发降低设计与制造成本。从用户需求出发就是减少综合工程费用,它包括为了让产品在使用保障期内无故障地运行而提高功能率,延长 MTBF(平均故障间隔:从一个故障排除后到下一个故障发生时的平均时间),减少因故障停机给用户造成的损失,进一步提高产品的工作能力。

1.5.3 设计规律

总结一般机械系统的设计,具有以下规律:根据设计要求首先确定离散元素间的逻辑关系,然后研究其相互间的物理关系,这样就可根据设计要求和手册确定其结构关系,最终完成全部设计工作。其中确定逻辑关系阶段是关键,如逻辑关系不合理,其设计必然不合理。在这一阶段可分两个步骤进行,首先进行功能分解,确定逻辑关系和功能结构,然后建立其物理模型、确定其物理作用关系。所谓功能就是使元素或子系统的输出满足设计要求。一般来说,不能用某种简单结构一下子满足总功能要求。这就需要进行功能分解,总功能可分解成若干子功能,子功能还可以进一步分解,直到功能元素。将这些子功能或功能元素按一定逻辑关系连接,来满足总功能的要求,这样就形成所谓功能结构。

从逻辑角度考虑把总功能分解并连接成功能结构,使实现功能的复杂程度大大降低,因为满足比较简单的功能元素的要求比满足总功能的高度抽象要求容易得多。如果将有关功能元素列成一个矩阵形式,则可得到不同连接的数种或数十种系统方案,然后根据符号逻辑运算进行优化筛选,就可得到较理想的系统方案。

1.6 机电一体化系统的开发工程与现代设计办法

1.6.1 机电一体化系统的开发工程

机电一体化系统(产品)种类繁多,涉及的技术领域及其技术的复杂程度不同,系统(产品)设计的类型也有区别。因此,机电一体化系统(产品)开发设计及其商品化过程也各有其具体特点。归纳其基本规律,机电一体化系统(产品)的开发工程之流程如图1—13所示。

1.6.2 机电一体化系统设计与现代设计方法

机电一体化系统(产品)的种类不同,其设计方法也不同。现代设计方法与用经验公式、图表和手册为设计依据的传统设计方法不同,它是以计算机为辅助手段进行机电一体化系统(产品)设计的有效方法。科学技术日新月异,技术创新发展迅猛。现代设计方法的内涵在不断扩展,新概念层出不穷。例如计算机辅助设计与并行工程、虚拟设计、快速响应设计等。

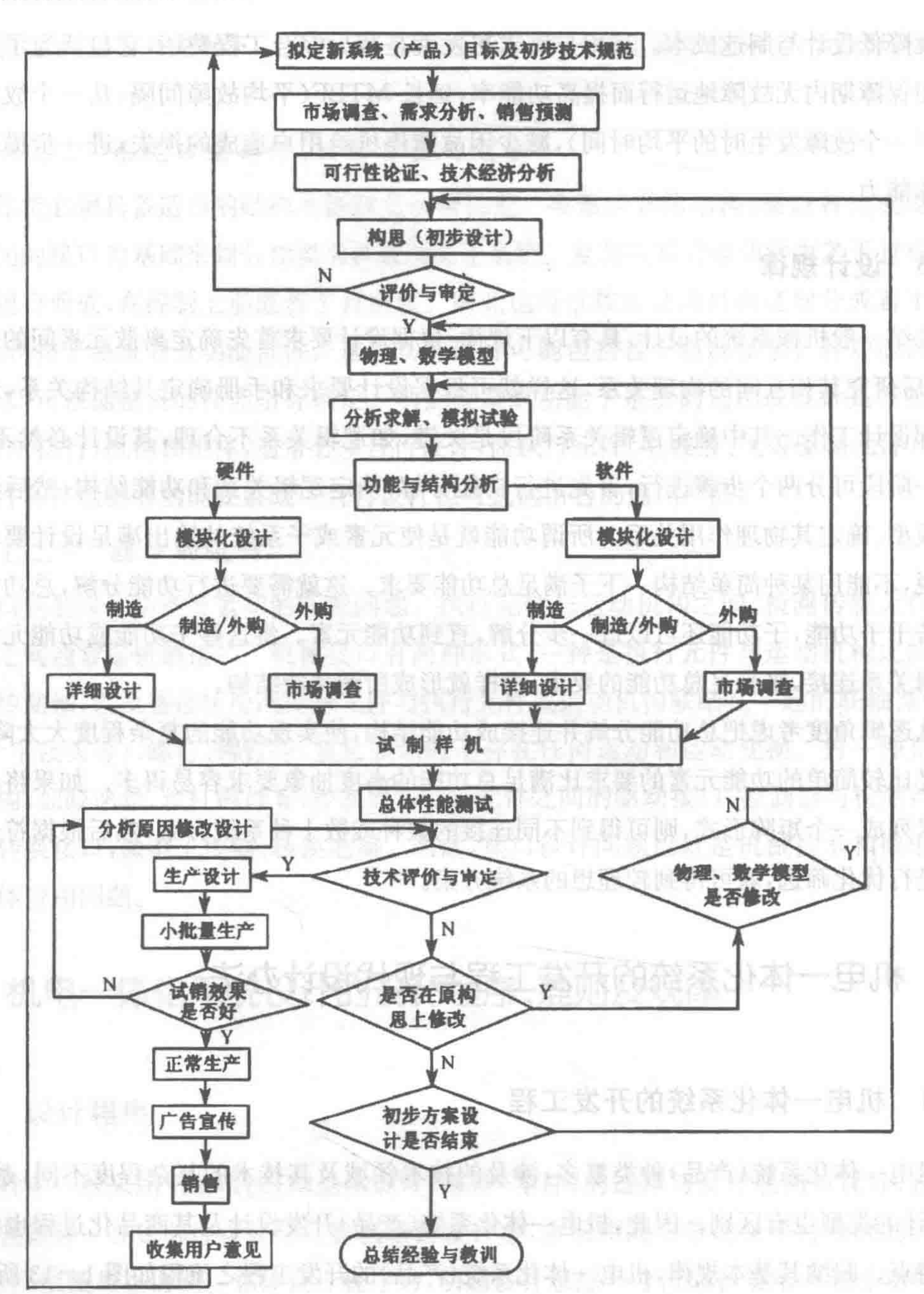


图 1—13　机电一体化系统(产品)开发工程流程

1.6.2.1　计算机辅助设计与并行工程

计算机辅助设计(CAD)是设计机电一体化产品(系统)的有力工具。用来设计一般机械产品的 CAD 的研究成果,包括计算机硬件和软件,以及图像仪和绘图仪等外围设备,都可以用于机电一体化产品(系统)的设计,需要补充的不过是有关机电一体化系统(产品)设计和制造的数据、计算方法和特殊表达的形式而已。应用 CAD 进行一般机电一体化系统(产品)设计时,都要涉及机械技术、微电子技术和信息技术的有机结合问题,从这种意义上来说,

CAD本身也是机电一体化技术的基本内容之一。

并行工程是把产品(系统)的设计、制造及其相关过程作为一个有机整体进行综合(并行)协调的一种工作模式。这种工作模式力图使开发者们从一开始就考虑到产品全寿命周期[从概念形成到产品(系统)报废]内的所有因素。并行工程的目标是提高产品(系统)的生命全过程(包括设计、工艺、制造、服务)中的全面质量,降低产品(系统)全寿命周期内(包括产品设计、制造、销售、客户应用、售后服务直至产品报废处理等)的成本,缩短产品(系统)研制开发的周期(包括减少设计反复,缩短设计、生产准备、制造及发送等的时间)。并行工程与串行工程的差异在于在产品的设计阶段就要按并行、交互、协调的工作模式进行产品(系统)设计,也就是说,在设计过程中对产品(系统)寿命周期内的各个阶段的要求要尽可能地同时进行交互式的协调。

1.6.2.2 虚拟产品设计

虚拟产品是虚拟环境中的产品模型,是现实世界中的产品在虚拟环境中的映像。虚拟产品设计是基于虚拟现实技术的新一代计算机辅助设计,是在基于多媒体的、交互的渗入式或侵入式的三维计算机辅助设计环境中,设计者不仅能够直接在三维空间中通过三维操作、语言指令、手势等高度交互的方式进行三维实体建模和装配建模,并且最终生成精确的产品(系统)模型,以支持详细设计与变型设计,同时能在同一环境中进行一些相关分析,从而满足工程设计和应用的需要。

1.6.2.3 快速响应设计

快速响应设计是实现快速响应工程的重要一环。快速响应工程是企业面对瞬息万变的市场环境,不断迅速开发适应市场需求的新产品(系统),以保证企业在激烈竞争环境中立于不败之地的重要工程。实现快速响应设计的关键是有效开发和利用各种产品(系统)信息资源。人们利用迅猛发展的计算机技术、信息技术和通信技术所提供的对信息资源的高度存储、传播及加工的能力,主要采取三项基本策略,以达到对产品(系统)设计需求的快速响应。

机电一体化产品(系统)的设计,通常可分为新颖性/创新设计和适应性/变异性设计两大类。创新设计也属于前面所讲的开发性设计。无论是创新设计还是变异性设计,均体现了设计人员的创造性思维。快速响应设计就是充分利用已有的信息资源和最新的数字化、网络化工具,用最快的速度进行创新性和变异性设计的机电一体化产品(系统)的设计方法。

第 2 章　机械系统设计

2.1 概　述

机电一体化机械系统是由计算机协调与控制的，用于完成包括机械力、运动和能量流等动力学任务的机械及机电部件相互联系的系统。其核心是由计算机控制的，包括机械、电力、电子、液压、光学等技术的伺服系统。它的主要功能是完成一系列机械运动，每一个机械运动可单独由控制电机、传动机构和执行机构组成的子系统来完成，而这些子系统要由计算机协调和控制，以完成其系统功能要求。机电一体化机械系统的设计要从系统的角度进行合理化和最优化设计。

机电一体化系统的机械结构主要包括执行机构、传动机构和支撑部件。在机械系统设计时，除考虑一般机械设计要求外，还必须考虑机械结构因素与整个伺服系统的性能参数、电气参数的匹配，以获得良好的伺服性能。

2.1.1 机电一体化对机械系统的基本要求

机电一体化系统的机械系统与一般的机械系统相比，除要求较高的制造精度外，还应具有良好的动态响应特性，即快速响应和良好的稳定性。

2.1.1.1　*高精度*

精度是指系统的输出量对系统的输入量复现的准确程度。精度直接影响产品的质量，尤其是机电一体化产品，其技术性能、工艺水平和功能比普通的机械产品都有很大的提高，因此机电一体化机械系统的高精度是其首要的要求。如果机械系统的精度不能满足要求，则无论机电一体化产品其他系统工作再精确，都很难完成其预定的机械操作。

2.1.1.2　*快速响应*

快速响应是指要求机械系统从接到指令到开始执行指令之间的时间间隔短。这样反馈系统才能快速反馈，控制系统才能及时根据机械系统的运行情况得到信息，下达指令，使其准确地完成任务。

2.1.1.3　*良好的稳定性*

机电一体化系统稳定性是指系统工作性能不受外界环境的影响和抗干扰的能力。机电

一体化系统要求其机械装置在温度、振动等外界干扰的作用下依然能够正常稳定地工作，即系统抵御外界环境的影响和抗干扰能力强。

为确保机械系统的上述特性，在设计中通常提出无间隙、低摩擦、低惯量、高刚度、高谐振频率和适当的阻尼比等要求。此外机械系统还要求具有体积小、重量轻、高可靠性和寿命长等特点。

2.1.2 机械系统的组成

机电一体化机械系统主要包括以下三大机构。

2.1.2.1 传动机构

机电一体化机械系统中的传动机构不仅仅是转速和转矩的变换器，而且已成为伺服系统的一部分，它要根据伺服控制的要求进行选择设计，以满足整个机械系统良好的伺服性能。因此传动机构除了要满足传动精度的要求，而且还要满足小型、轻量、高速、低噪声和高可靠性的要求。

2.1.2.2 导向机构

导向机构的作用是支撑和导向，为机械系统中各运动装置能安全、准确地完成其特定方向的运动提供保障，一般指导轨、轴承等。

2.1.2.3 执行机构

执行机构是用以完成操作任务的直接装置。执行机构根据操作指令的要求在动力源的带动下，完成预定的操作。一般要求它具有较高的灵敏度、精确度，良好的重复性和可靠性。由于计算机的强大功能，使传统的作为动力源的电机发展为具有动力、变速与执行等多重功能的伺服电机，从而大大地简化了传动和执行机构。

除了以上三部分外，机电一体化系统的机械部分通常还包括机座、支架、壳体等。

2.1.3 机械系统的设计思想

机电一体化的机械系统设计主要包括两个环节：静态设计和动态设计。

2.1.3.1 静态设计

静态设计是指依据系统的功能要求，通过研究制订出机械系统的初步设计方案。该方案只是一个初步的轮廓，包括系统主要零部件的种类，各部件之间的连接方式，系统的控制方式，所需能源方式等。

有了初步设计方案后，开始着手按技术要求进行稳态设计，设计系统的各组成部件的结构、运动关系及参数；零件的材料、结构、制造精度确定；执行元件（如电机）的参数、功率及过载能力的验算；相关元、部件的选择；系统的阻尼配置等。稳态设计保证了系统的静态特性要求。

2.1.3.2 **动态设计**

动态设计是研究系统在频率域的特性，是借助静态设计的系统结构，通过建立系统各环节的数学模型和推导出系统整体的传递函数，利用自动控制理论的方法求得该系统的频率特性（幅频特性和相频特性）。系统的频率特性体现了系统对不同频率信号的反应，决定了系统的稳定性、最大工作频率和抗干扰能力。

静态设计是忽略了系统自身运动因素和干扰因素的影响状态下进行的产品设计，对于伺服精度和响应速度要求不高的机电一体化系统，静态设计就能够满足设计要求。对于精密和高速智能化机电一体化系统，环境干扰和系统自身的结构及运动因素对系统产生的影响会很大，因此必须通过调节各个环节的相关参数，改变系统的动态特性以保证系统的功能要求。动态分析与设计过程往往会改变前期的部分设计方案，有时甚至会推翻整个方案，要求重新进行静态设计。

2.2 传动机构设计

机电一体化机械系统要求精度高、运动平稳、工作可靠，这不仅仅是机械传动和结构所能解决的问题，而是要通过控制装置，使机械传动部分与伺服电动机的动态特性相匹配，所以在设计过程中要综合考虑传动机构与控制装置、伺服电动机的相互影响。

2.2.1 传动机构性能要求

机电一体化机械系统应具有良好的伺服性能（即精度高、快速响应性和稳定性好），从而要求传动机构满足以下几个方面。

2.2.1.1 **转动惯量小**

在不影响机械系统刚度的前提下，传动机构的质量和转动惯量应尽量减小。否则，转动惯量大会对系统造成不良影响，机械负载增大；系统响应速度降低，灵敏度下降；系统固有频率减小，容易产生谐振。所以在设计传动机构时应尽量减小转动惯量。

2.2.1.2 **刚度大**

刚度是使弹性体产生单位变形量所需的作用力。大刚度对机械系统而言是有利的：①伺服系统动力损失随之减小；②机构固有频率高，超出机构的频带宽度，使之不易产生共振；③增加闭环伺服系统的稳定性。所以在设计时应选用大刚度的机构。

2.2.1.3 **阻尼合适**

机械系统产生振动时，系统的阻尼越大，其最大振幅就越小且衰减也越快，但大阻尼也会使系统的稳态误差增大、精度降低。所以设计时，传动机构的阻尼要选择适当。

此外还要求摩擦小(提高机构的灵敏度)、抗振性好(提高机构的稳定性)、间隙小(保证机构的传动精度),特别是其动态特性应与伺服电动机等其他环节的动态特性相匹配。

下面介绍几种常用的传动机构及其设计计算方法。

2.2.2　无侧隙齿轮传动机构

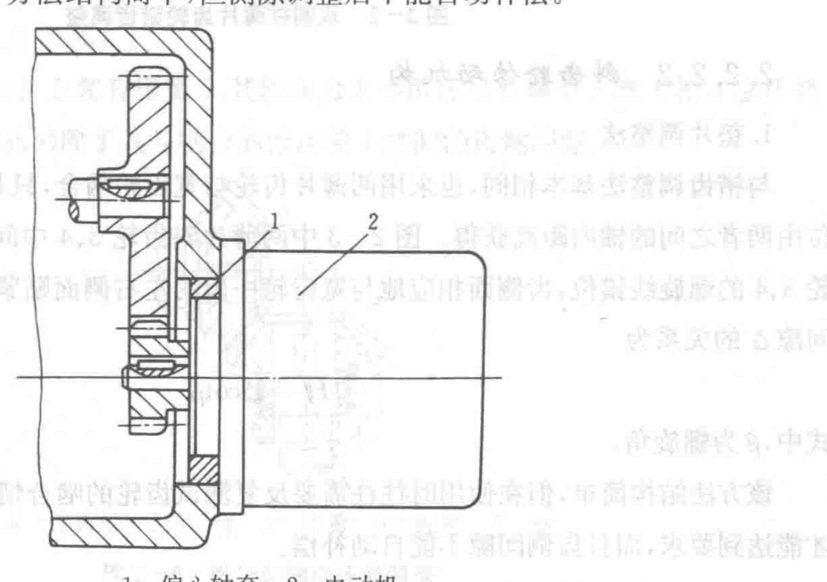
由于齿轮传动的瞬时传动比为常数,传动精确度高,可做到零侧隙无回差,强度大能承受重载,结构紧凑,摩擦力小和效率高等原因,齿轮传动副成为在机电一体化机械系统中目前使用最多的传动机构。

机电一体化产品往往要求传动机构具有自动变向功能,这就要求齿轮传动机构必须采取措施消除齿侧间隙,以保证机构的双向传动精度。

2.2.2.1　直齿圆柱齿轮传动机构

1. 偏心轴套调整法

图 2—1 所示为最简单的偏心轴套式消隙结构。电动机 2 通过偏心轴套 1 装在壳体上。转动偏心轴套 1 可以调整两啮合齿轮的中心距,从而消除直齿圆柱齿轮传动的齿侧间隙及其造成的换向死区。这种方法结构简单,但侧隙调整后不能自动补偿。



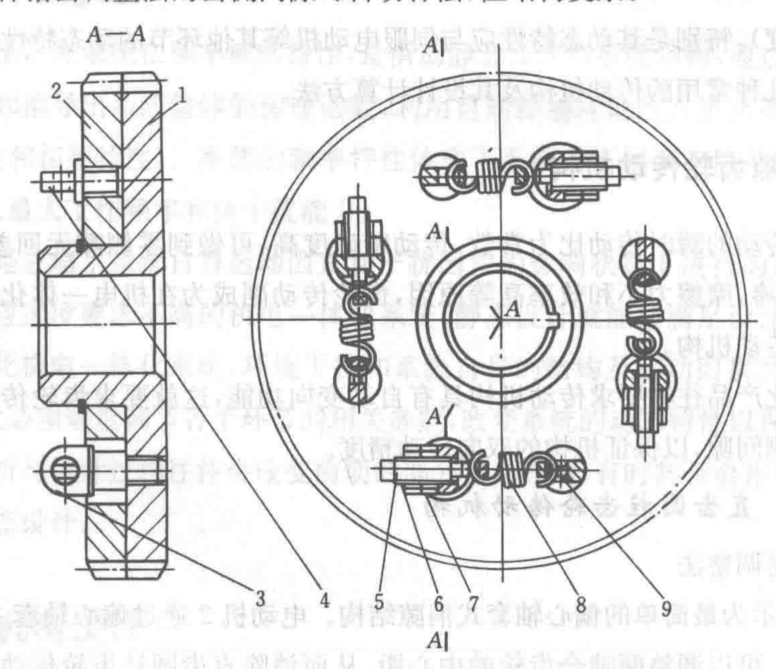
1—偏心轴套　2—电动机

图 2—1　偏心轴套式消隙结构

2. 双片薄齿轮错齿调整法

两个啮合的直齿圆柱齿轮中一个采用宽齿轮,另一个由两片可以相对转动的薄片齿轮组成。装配时使一片薄齿轮的齿左右两侧,通过两薄片齿轮的错齿,消除齿侧间隙,反向时也不会出现死区。如图 2—2 所示,两薄片齿轮 1、2 上各装入有螺纹的凸耳 3、4,螺钉 5 装在凸耳 3 上,螺母 6、7 可调节螺钉 5 的伸出长度。弹簧 8 一端勾在凸耳 9 上,另一端勾在螺钉 5 上。转动螺母 7(螺母 6 用于锁紧)可改变弹簧 8 的张力大小,调节齿轮 1、2 的相对位置,

达到错齿。这种错齿调整法的齿侧间隙可自动补偿，但结构复杂。



1、2—薄片齿轮　3、4、9—凸耳　5—螺钉　6、7—螺母　8—弹簧

图 2—2　双圆柱薄片齿轮错齿调整

2.2.2.2　斜齿轮传动机构

1. 垫片调整法

与错齿调整法基本相同，也采用两薄片齿轮与宽齿轮啮合，只是两薄片斜齿轮之间的错位由两者之间的轴向距离获得。图 2—3 中两薄片斜齿轮 3、4 中间加一垫片 2，使薄片斜齿轮 3、4 的螺旋线错位，齿侧面相应地与宽齿轮一齿的左右侧面贴紧。垫片的厚度 H 与齿侧间隙 Δ 的关系为

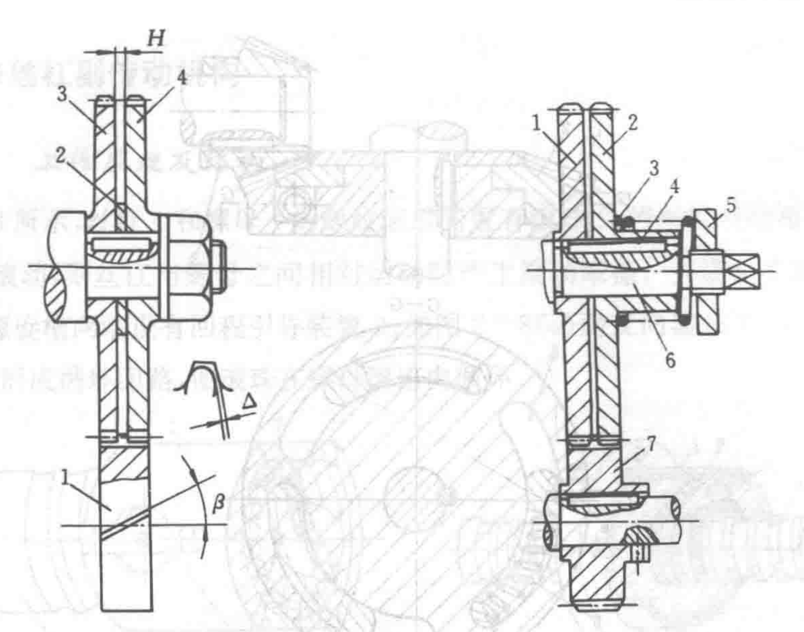
$$H = \Delta\cot\beta \tag{2—1}$$

式中，β 为螺旋角。

该方法结构简单，但在使用时往往需要反复测试齿轮的啮合情况，反复调节垫片的厚度才能达到要求，而且齿侧间隙不能自动补偿。

2. 轴向压簧调整法(图 2—4)

该方法是用弹簧 3 的轴向力来获得薄片斜齿轮 1、2 之间的错位，使其齿侧面分别紧贴宽齿轮 7 的齿槽的两侧面。薄片齿轮 1、2 用键 4 套在轴 6 上。弹簧 3 的轴向力用螺母 5 来调节，其大小必须恰当。该方法的特点是齿侧间隙可以自动补偿，但轴向尺寸较大，结构不紧凑。



1—斜齿轮　2—垫片　3、4—薄片斜齿轮

图 2—3　斜齿薄片齿轮垫片调整

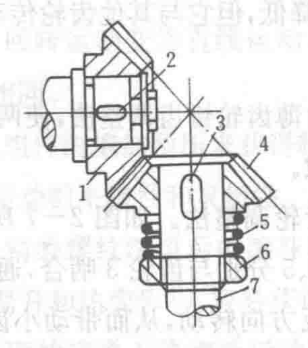
1、2—薄片齿轮　3—弹簧　4—键　5—螺母　6—轴　7—宽齿轮

图 2—4　斜齿薄片齿轮轴向压簧调整

2.2.2.3　锥齿轮传动机构

1. 轴向压簧调整法(图 2—5)

在锥齿轮 4 的传动轴 7 上装有压簧 5，其轴向力大小由螺母 6 调节。锥齿轮 4 在压簧 5 的作用下可轴向移动，从而消除了其与啮合的锥齿轮 1 之间的齿侧间隙。

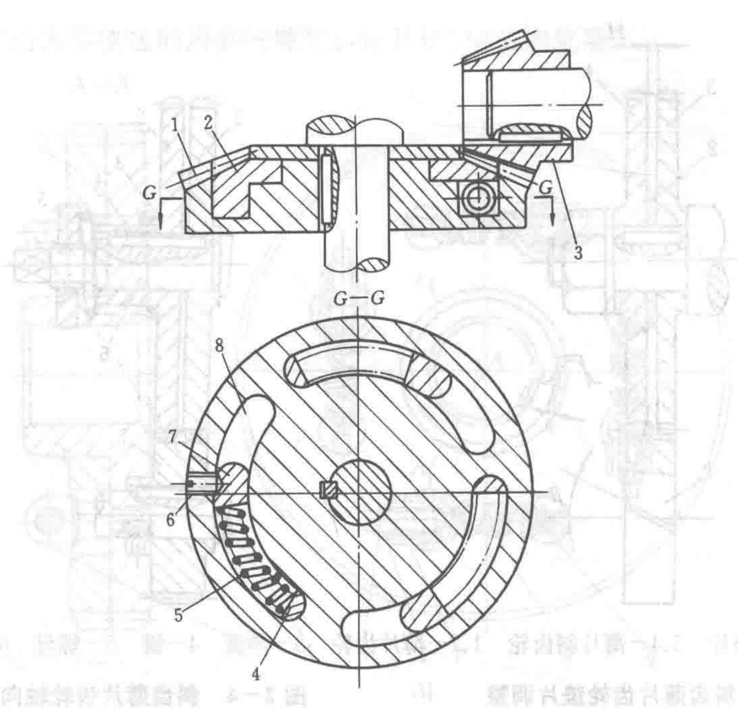


1、4—锥齿轮　2、3—键　5—压簧　6—螺母　7—轴

图 2—5　锥齿轮轴向压簧调整

2. 周向弹簧调整法(图 2—6)

将与锥齿轮 3 啮合的齿轮做成大小两片(1、2)，在大片锥齿轮 1 上制有三个周向圆弧槽 8，小片锥齿轮 2 的端面制有三个可伸入槽 8 的凸爪 7。弹簧 5 装在槽 8 中，一端顶在凸爪 7 上，另一端顶在镶在槽 8 中的镶块 4 上。止动螺钉 6 装配时用，安装完毕将其卸下，则大小片锥齿轮 1、2 在弹簧力作用下错齿，从而达到消除间隙的目的。



1—大片锥齿轮　2—小片锥齿轮　3—锥齿轮　4—镶块　5—弹簧　6—止动螺钉　7—凸爪　8—槽

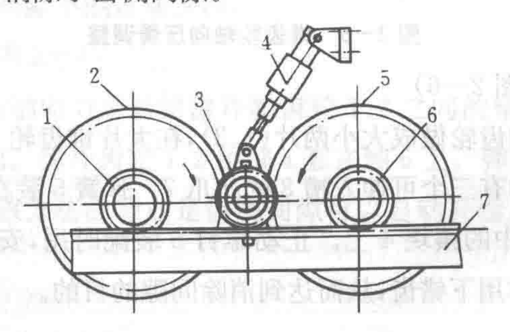
图 2—6　锥齿轮周向弹簧调整

2.2.2.4　齿轮齿条传动机构

在机电一体化产品中对于大行程传动机构往往采用齿轮齿条传动，因为其刚度、精度和工作性能不会因行程增大而明显降低，但它与其他齿轮传动一样也存在齿侧间隙，应采取消隙措施。

当传动负载小时，可采用双片薄齿轮错齿调整法，使两片薄齿轮的齿侧分别紧贴齿条的齿槽两相应侧面，以消除齿侧间隙。

当传动负载大时，可采用双齿轮调整法。如图 2—7 所示，小齿轮 1、6 分别与齿条 7 啮合，与小齿轮 1、6 同轴的大齿轮 2、5 分别与齿轮 3 啮合，通过预载装置 4 向齿轮 3 上预加负载，使大齿轮 2、5 同时向两个相反方向转动，从而带动小齿轮 1、6 转动，其齿便分别紧贴在齿条 7 上齿槽的左、右侧，消除了齿侧间隙。



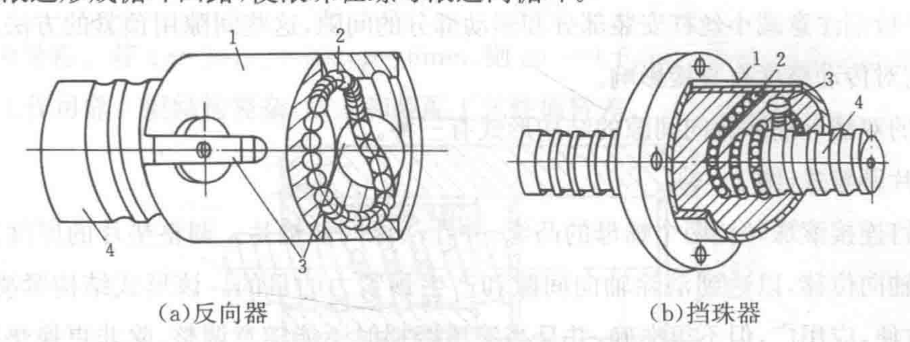
1、6—小齿轮　2、5—大齿轮　3—齿轮　4—预载装置　7—齿条

图 2—7　双齿轮调整

2.2.3 滚珠丝杠副传动机构

2.2.3.1 工作原理及结构

如图 2—8 所示，丝杠 4 和螺母 1 的螺纹滚道间置有滚珠 2，当丝杠或螺母转动时，滚珠 2 沿螺纹滚道滚动，则丝杠与螺母之间相对运动时产生滚动摩擦。为防止滚珠从滚道中滚出，在螺母的螺旋槽两端设有回程引导装置 3，如图 2—8(a)的反向器和图(b)的挡珠器，它们与螺纹滚道形成循环回路，使滚珠在螺母滚道内循环。



(a)反向器　　(b)挡珠器

1—螺母　2—滚珠　3—回程引导装置　4—丝杠

图 2—8　滚珠丝杠副

2.2.3.2 滚珠丝杠副的特点

(1)传动效率高。效率高达 90%～95%，耗费的能量仅为滑动丝杠的 1/3。

(2)运动具有可逆性。既可将回转运动变为直线运动，又可将直线运动变为回转运动，且逆传动效率几乎与正传动效率相同。

(3)系统刚度好。通过给螺母组件内施加预压来获得较高的系统刚度，可满足各种机械传动要求，无爬行现象，始终保持运动的平稳性和灵敏性。

(4)传动精度高。经过淬硬并精磨螺纹滚道后的滚珠丝杠副本身就具有很高的制造精度，又由于摩擦小，丝杠副工作时温升和热变形小，容易获得较高的传动精度。

(5)使用寿命长。滚珠是在淬硬的滚道上作滚动运动，磨损极小，长期使用后仍能保持其精度，因而寿命长，且具有很高的可靠性。其寿命一般比滑动丝杠要高 5～6 倍。

(6)不能自锁。特别是垂直安装的丝杠，当运动停止后，螺母将在重力作用下下滑，故常需设置制动装置。

(7)制造工艺复杂。滚珠丝杠和螺母等零件加工精度、表面粗糙度要求高，制造成本高。

由于滚珠丝杠副独特的性能，其受到极高的评价，现已成为数控机床、精密机械、各种省力机械设备及各种机电一体化产品中不可缺少的传动机构。

2.2.3.3 滚珠丝杠副轴向间隙的调整和施加预紧力的方法

滚珠丝杠副除了对本身单一方向的传动精度有要求外，对其轴向间隙也有严格要求，以

保证其反向传动精度。滚珠丝杠副的轴向间隙是承载时在滚珠与滚道型面接触点的弹性变形所引起的螺母位移量和螺母原有间隙的总和。通常采用双螺母预紧的方法，把弹性变形控制在最小限度内，以减小或消除轴向间隙，并可以提高滚珠丝杠副的刚度。

目前，制造的单螺母式滚珠丝杠副的轴向间隙达 0.05mm，而双螺母式的经加预紧力调整后基本上能消除轴向间隙。应用该方法消除轴向间隙时应注意以下两点。

(1)预紧力大小必须合适，过小不能保证无隙传动，过大将使驱动力矩增大，效率降低，寿命缩短。预紧力应不超过最大轴向负载的 1/3。

(2)要特别注意减小丝杠安装部分和驱动部分的间隙，这些间隙用预紧的方法是无法消除的，而它对传动精度有直接影响。

常用的双螺母消除轴向间隙的结构形式有三种。

1. 垫片调隙式(图 2—9)

用螺钉连接滚珠丝杠两个螺母的凸缘，并在凸缘间加垫片。调整垫片的厚度使螺母产生微量的轴向位移，以达到消除轴向间隙和产生预紧力的目的。该形式结构紧凑，工作可靠，调整方便，应用广，但不很准确，并且当滚道磨损时不能随意调整，除非更换垫圈。故适用于一般精度的传动机构。

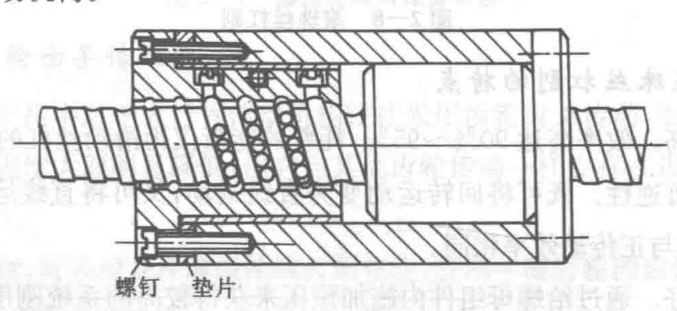


图 2—9 垫片调隙式滚珠丝杠副

2. 螺纹调隙式(图 2—10)

双螺母中的一个外端有凸缘，一个外端无凸缘但制有螺纹。它伸出套筒外，用两个圆螺母固定锁紧，并用键防止两螺母相对转动。旋转圆螺母可调整消除间隙并产生预紧力，之后再用锁紧螺母锁紧。该形式结构紧凑、工作可靠、调整方便，缺点是不很精确。

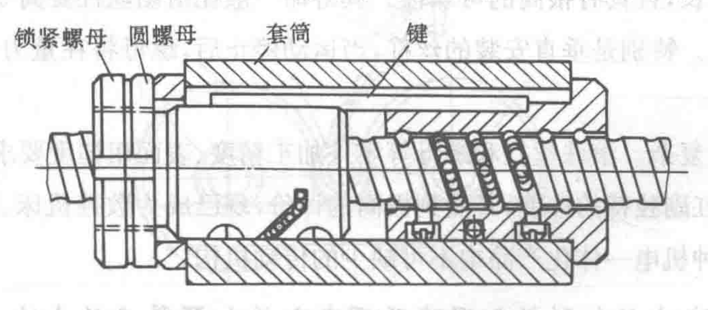


图 2—10 螺纹调隙式滚珠丝杠副

3. 齿差调隙式(图 2—11)

在两个螺母的凸缘上各制有圆柱外齿轮(齿数为 z_1、z_2,且 $z_2-z_1=1$)分别与内齿圈啮合,内齿圈用螺钉或定位销固定在套筒上。调整时,先取下两端的内齿圈,使两螺母产生相对角位移,相应地产生轴向的相对位移,从而两螺母中的滚珠分别紧贴在螺旋滚道的两个相反的侧面上,然后将内齿圈复位固定,故而达到消除间隙,产生预紧力的目的。当两个螺母按同方向转过一个齿时,所产生的相对轴向位移为

$$\Delta s=\left(\frac{1}{z_1}-\frac{1}{z_2}\right)p=\frac{z_2-z_1}{z_1 z_2}p=\frac{p}{z_1 z_2} \tag{2-2}$$

式中,p 为导程。若 $z_1=99$,$z_2=100$,$p=6\text{mm}$,则 $\Delta s=0.6\mu\text{m}$。可见,该形式的调整结构精度很高,工作可靠。但结构复杂,加工和装配工艺性能较差。

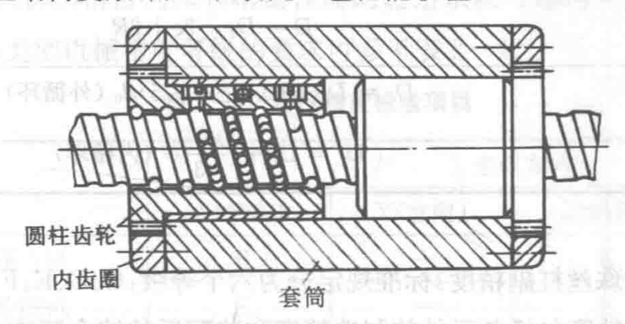


图 2—11 齿差调隙式的滚珠丝杠副

2.2.3.4 滚珠丝杠副的主要尺寸、精度等级和标注方法

1. 主要尺寸

滚珠丝杠副的主要尺寸及其计算公式列于表 2—1。

表 2—1 滚珠丝杠副主要尺寸计算公式

主要尺寸	符号	计算公式												
标称直径(滚珠中心圆直径)	D_0 mm	30		40		50			60			80		根据承载能力选用
导程	p mm	5	6	6	8	6	8	10	8	10	12	10	12	根据承载能力选用
螺旋升角	$\lambda(°)$	3°2′	3°39′	2°44′	3°39′	2°11′	2°55′	3°39′	2°26′	3°2′	3°39′	2°17′	2°44′	$\lambda=\arctan\frac{p}{\pi D_0}$ 一般 $\lambda=2°\sim5°$
滚珠直径	D_0 mm	3.175	3.969	3.969	4.763	3.969	4.763	5.953	4.763	5.953	7.144	5.953	7.144	
螺纹滚道半径	R	一般 $R=(0.52\sim0.58)d_0$ 目前,内循环常取 $R=0.52d_0$ 外循环常取 $R=0.52d_0$ 或 $R=0.56d_0$												

续表

主要尺寸	符号	计算公式
接触角	α	$\alpha=45°$
偏心距	e	$e=\left(R-\frac{d_0}{2}\right)\sin\alpha=0.707\left(R-\frac{d_0}{2}\right)$
丝杠外径	d	$d=D_0-(0.20.25)d_0$
丝杠内径	d_1	$d_1=D_0+2e-2R$
螺纹牙顶圆角半径	r_3	$r_3=0.1d_0$（用于内循环）
螺母外径	D	$D=D_0-2e+2R$
螺母内径	D_1	$D_1=D_0+(0.2\sim0.25)d_0$（外循环） $D_1=D_0+\frac{D_0-d}{3}$（内循环）

2. 精度等级

JB316.2—82《滚珠丝杠副精度》标准规定分为六个等级：C、D、E、F、G、H。C级最高，H级最低。滚珠丝杠副精度包括各元件的制造精度和装配后的综合精度，如：丝杠公称直径尺寸变动量、丝杠和螺母的表面粗糙度、丝杠大径对螺纹轴线的径向圆跳动、导程误差等。各等级对各项均有公差要求。表2－2列出了各精度等级的导程公差。

表2－2　滚珠丝杠副精度等级导程公差

项目	符号	精度等级					
		C	D	E	F	G	H
基本导程极限偏差/μm	δL_0	±4	±5	±6	—	—	—
2π弧度内导程公差/μm	$\delta L_{2\pi}$	4	5	6	—	—	—
任意300mm内导程公差/μm	δL_{300}	5	10	15	25	50	100
螺纹全长内导程公差/μm	δL_1	$\delta L_1=\delta L_{300}\times\left(\frac{L-2L_0}{300}\right)^{K_1}$					
	K_1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0
导程误差曲线的带宽公差/μm	δL_b	$\delta L_b=\delta L_{300}\times\left(\frac{L-2L_0}{300}\right)^{K_2}$					
	K_2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	—

注：测量螺纹全长内导程误差时，应在螺纹两端分别扣除长度L_0，$L_0=(2\sim4)$p（p为基本导程）。

为提高经济性，按实际使用的精度要求，在每一精度等级内再分项，用以规定各精度等级的检查项目。表2－3列出导程精度的检验项目。项目1～5表示导程精度检验项目的规定内容，未指定的检验项目，其误差值不超过下一等级的规定值，H级不作规定。例如D_3表示只检验前3个项目，其余2个项目不得超过E级的规定。

表 2—3 导程精度检验项目

序号	项目	符号	检验项目选择标号				
			1	2	3	4	5
1	任意 300mm 螺纹长度内导程误差	ΔL_{300}	√	√	√	√	√
2	螺纹全长内导程误差	ΔL_{1}		√	√	√	√
3	导程误差曲线的带宽	ΔL_{b}			√	√	√
4	基本导程偏差	ΔL_{0}				√	√
5	2π 弧度内导程误差	$\Delta L_{2\pi}$					√

设计选用时，应根据传动机构的精度（如定位精度、重复精度等）要求，选择滚珠丝杠副的精度等级。如数控机床、精密机床和精密仪器的进给系统可选用 C、D、E 级，一般动力传动，可选 F、G 级。各类型机械精度等级的要求可参考表 2—4。

表 2—4 导程精度检验项目

机械种类		坐标方向			
		X(横向)	Y(立向)	Z(纵向)	W(刀杆、镗杆)
开环系统	数控压力机	E	—	E	—
	数控绘图机	E	—	E	
	数控车床	E、D	—	E	—
	数控磨床	D、C	—	D	—
	数控线切割机	D	—	D	—
	数控钻床	E	E、F	E	—
	数控铣床	D	D	D	—
	数控镗床	D、C	D、C	D、C	E
	数控坐标镗床	D、C	D、C	D、C	D
	自动换刀数控机床	D、C	D、C	D、C	E
坐标镗床，螺纹磨床		D、C	D、C	D、C	D
仪表机床		D、C	D、C	D、C	—
普通机床，通用机床		F	F	F	—

3. 标注方法

滚珠丝杠副的标注采用汉语拼音字母、数字及汉字，全称标注方法如图 2—12 所示。各制造厂略有不同。例如：FFZD40 5—3—D3/1400×900（南京工艺装备制造厂），表示浮动式内循环、法兰与直筒螺母组合垫片预紧、标称直径 40mm，基本导程 5mm、承载滚珠总圈数为 3 圈、D 级精度、检验 1～3 项，右旋、丝杠全长 1400mm、螺纹长度 900mm。FC1B—6006—5—E2 左（汉江机床厂），表示法兰凸出式插管型、变位螺距、预加载荷、标称直径 60mm、基本导程 6mm、每个螺母上承载滚珠总圈数为 5 圈、E 级精度、检查 1、2 项、左旋螺纹。

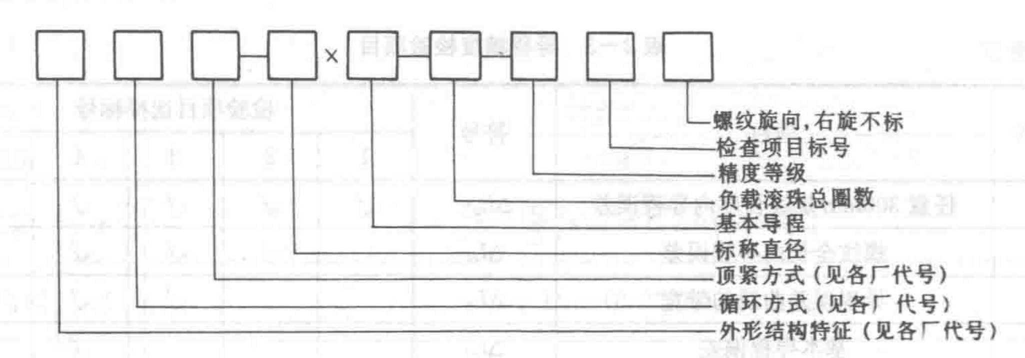


图 2—12　滚珠丝杠副的标注

2.2.3.5　滚珠丝杠副的安装

1. 支承方式的选择

为了保证滚珠丝杠副传动的刚度和精度，应选择合适的支承方式，选用高刚度、小摩擦力矩、高运转精度的轴承，并保证支承座有足够的刚度。

滚珠丝杠副的支承按其限制丝杠轴的轴向窜动情况，分为三种形式，表 2—5 分别列出各形式的特点。

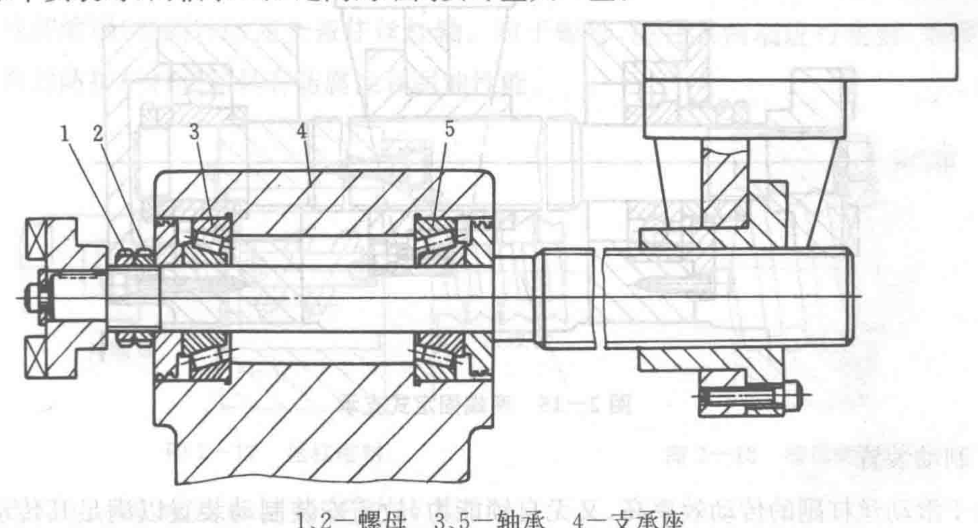
表 2—5　滚珠丝杠副支承形式

支承形式	简图	特点
一端固定一端自由(F—O)	F　l　O	1. 结构简单 2. 丝杠的轴向刚度比两端固定低 3. 丝杠的压杆稳定性和临界转速都较低 4. 设计时尽量使丝杠受拉伸 5. 适用于较短和竖直的丝杠
一端固定一端游动(F—S)	F　l　S	1. 需保持螺母与两端支承同轴，故结构较复杂，工艺较困难 2. 丝杠的轴向刚度和 F—O 相同 3. 压杆稳定性和临界转速比同长度的 F—O 型高 4. 丝杠有热膨胀的余地 5. 适用于较长的卧式安装丝杠

续表

支承形式	简图	特点
两端固定 （F—F）	F　l　F	1. 同 F—S 的 1 2. 只要轴承无间隙，丝杠的轴向刚度为一端固定的 4 倍 3. 丝杠一般不会受压，无压杆稳定问题，固有频率比一端固定要高 4. 可以预拉伸，预拉伸后可减少丝杠自重的下垂和热补偿膨胀，但需一套预拉伸机构，结构及工艺都比较困难 5. 要进行预拉伸的丝杠，其目标行程应略小于公称行程，减少量等于拉伸量 6. 适用于对刚度和位移精度要求高的场合

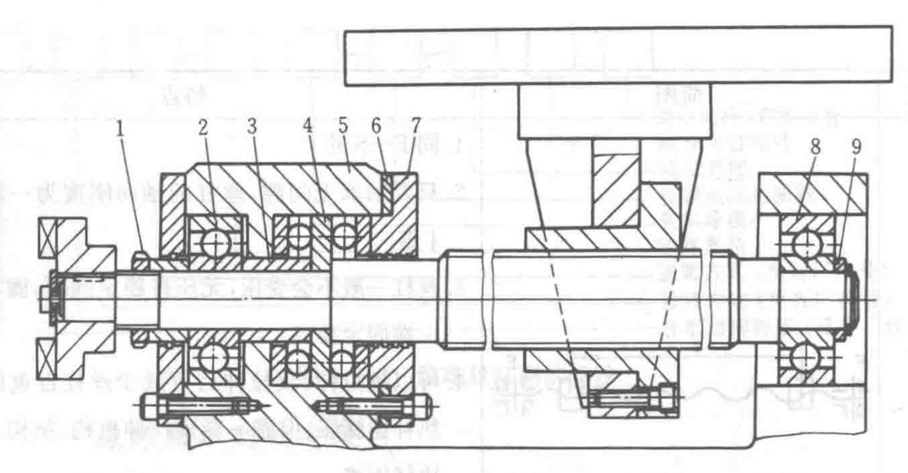
（1）一端固定、一端自由（F—O）。如图 2—13 所示，其固定端轴向、径向都需要有约束，采用圆锥滚子轴承 3、5。轴承外圈由支承座 4 的台肩轴向限位，内圈由螺母 1、2 及轴肩轴向限位。两轴承采用背靠背组配方式，可增大轴承间的有效支点距离，可承受双向的轴向载荷和径向载荷，并有较大的承受倾斜力矩的能力。这种结构只能用于短丝杠或竖直安装的丝杠，在水平安装时，两轴承 3、5 之间的距离要尽量大一些。



1、2—螺母　3、5—轴承　4—支承座

图 2—13　一端固定一端自由式支承

（2）一端固定、一端游动（F—S）。如图 2—14 所示。固定端采用深沟球轴承 2 和双向推力球轴承 4，可分别承受径向和轴向负载，螺母 1、挡圈 3、轴肩、支承座 5 台肩、端盖 7 提供轴向限位，垫圈 6 可调节推力轴承 4 的轴向预紧力。游动端需要径向约束，轴向无约束。采用深沟球轴承 8，其内圈由挡圈 9 限位，外圈不限位，以保证丝杠在受热变形后可在游动端自由伸缩。



1—螺母 2、8—深沟球轴承 3—挡圈 4—双向推力球轴承 5—支承座 6—垫圈 7—端盖 9—挡圈

图 2—14 一端固定一端游动式支承

(3)两端固定(F—F)。两端固定方式的支承为减少丝杠因自重的下垂和补偿热膨胀，应进行预拉伸。如图 2—15 所示，两端各采用一个推力角接触球轴承，外圈限位，内圈分别用螺母进行限位和预紧；调节轴承的间隙，并根据预计温升产生的热膨胀量对丝杠进行预拉伸。只要实际温升不超过预计的温升，这种支承方式就不会产生轴向间隙。

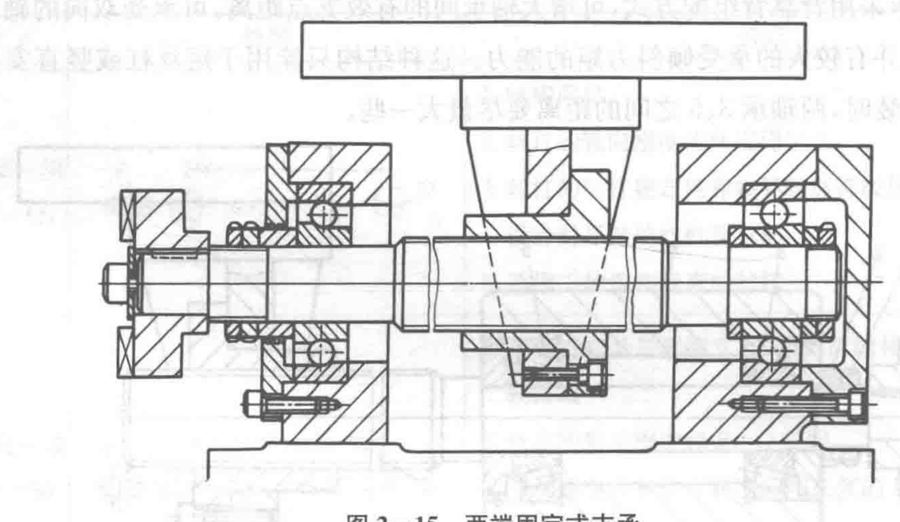
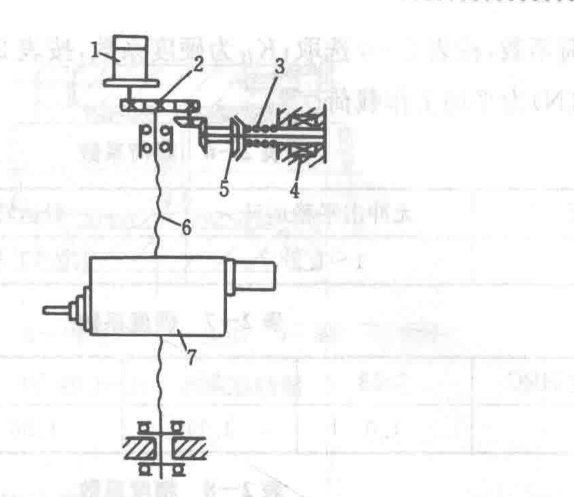


图 2—15 两端固定式支承

2. 制动装置

由于滚动丝杠副的传动效率高，又无自锁能力，故需安装制动装置以满足其传动要求，特别是当其处于垂直传动时。

图 2—16 所示为数控卧式铣镗床主轴箱进给丝杠的制动装置示意图。当机床工作时，电磁铁线圈 4 通电吸住压簧 3，打开摩擦离合器 5。此时步进电动机 1 接受指令脉冲，将旋转运动通过减速齿轮 2 传动、滚珠丝杠 6 旋转，转换为主轴箱 7 的垂直方向的移动。当步进电动机 1 停止转动时，电磁铁线圈也同时断电，在压簧 3 作用下摩擦离合器 5 被压紧，使滚珠丝杠不能自由转动，则主轴箱就不会因自重而下滑。



1—步进电动机 2—齿轮 3—压簧 4—电磁铁线圈 5—摩擦离合器 6—滚珠丝杠 7—主轴箱

图2—16 制动装置示意图

3.润滑和密封

(1)润滑。润滑剂可提高滚珠丝杠副的耐磨性和传动效率。润滑剂分为润滑油、润滑脂两大类。润滑油为一般机油或90～180号透平油或140号主轴油,可通过螺母上的油孔将其注入螺纹滚道;润滑脂可采用锂基油脂,它加在螺纹滚道和安装螺母的壳体空间内。

(2)密封。滚珠丝杠副在使用时常采用一些密封装置进行防护。为防止杂质和水进入丝杠(否则会增加摩擦或造成损坏),对于预计会带进杂质之处按图2—17所示使用波纹管(右侧)或伸缩罩(左侧),以完全盖住丝杠轴。对于螺母,应在其两端进行密封,如图2—18所示。密封防护材料必须具有防腐蚀和耐油性能。

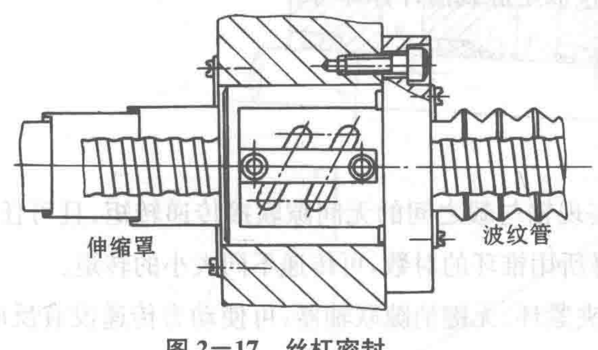


图2—17 丝杠密封

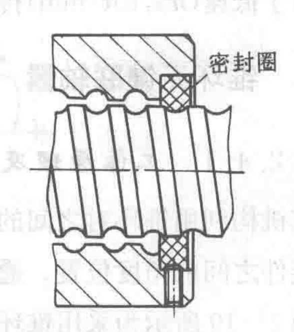


图2—18 螺母端部密封

2.2.3.6 *滚珠丝杠副的设计计算*

设计滚珠丝杠副时,已知条件是:工作载荷F(N)或平均工作载荷F_m(N),使用寿命L_h'(h),丝杠的工作长度(或螺母的有效行程)L(m),丝杠的转速n(平均转速n_m或最大转速n_{max})(r/min),以及滚道硬度HRC和运转情况。

设计步骤及方法如下:

(1)计算载荷F_C(N)的计算

$$F_C = K_F K_H K_A F_m \qquad (2-3)$$

式中,K_F为载荷系数,按表 2—6 选取;K_H为硬度系数,按表 2—7 选取;K_A为精度系数,按表 2—8 选取;F_m(N)为平均工作载荷。

表 2—6 载荷系数

载荷性质	无冲击平稳运转	一般运转	有冲击和振动运转
K_F	1～1.2	1.2～1.5	1.5～2.5

表 2—7 硬度系数

滚道实际硬度 HRC	≥58	55	50	45	40
K_H	1.0	1.11	1.56	2.4	3.85

表 2—8 精度系数

精度等级	C、D	E、F	G	H
K_A	1.0	1.1	1.25	1.43

(2)额定动载荷计算值 C'_a(N)的计算

$$C'_a = F_C\sqrt[3]{\frac{n_m L'_h}{1.67\times 10^4}} \tag{2—4}$$

(3)根据 C'_a 值从滚珠丝杠副系列中选所需要的规格,使所选规格的丝杠副的额定动载荷 C_a 值等于或大于 C'_a,并列出其主要参数值。

(4)验算传动效率、刚度及工作平稳性是否满足要求,如不能,则应另选其他规格并重新验算。

对于低速($n\leqslant$10r/min)传动,只按额定静载荷计算即可。

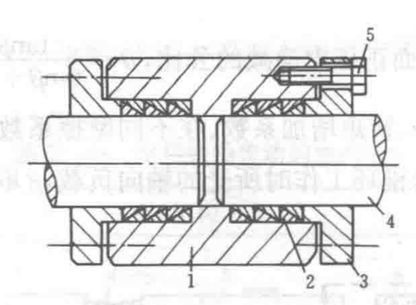
2.2.4 锥环无键联轴器

2.2.4.1 工作原理及特点

该机构利用锥环对之间的摩擦实现轴与毂之间的无间隙联接传递转矩,且可任意调节两联接件之间的角度位置。通过选择所用锥环的对数,可传递不同大小的转矩。

图 2—19 所示为采用锥环(锥形夹紧环)无键消隙联轴器,可使动力传递没有反向间隙。螺钉 5 通过压圈 3 施加轴向力时,由于锥环之间的楔紧作用,内外环 2 分别产生径向弹性变形,消除轴 4 与套筒 1 之间的配合间隙,并产生接触压力,通过摩擦传递转矩,而且套筒 1 与轴 4 之间的角度位置可以任意调节。

这种联轴器定心性好,承载能力高,传递功率大、转速高、使用寿命长,具有过载保护能力,能在受振动和冲击载荷等恶劣条件下连续工作,安装、使用和维护方便,作用于系统中的载荷小、噪声低。



1—套筒　2—内外环　3—压圈　4—轴　5—螺钉

图 2—19　消隙联轴器

2.2.4.2　设计计算

1. 一对锥环的传递转矩 T_t 的计算

如图 2—20 所示，锥环与联接套筒接触面的正压力 F_N(N)为：

$$F_N = \frac{F_A - F_0}{\tan\beta + 2\mu}$$

式中，F_A 为轴向力(N)；F_0 为使锥环与轴以及轮毂内壁接触时所加的预压紧力(N)；β 为锥面半角(°)；μ 为摩擦系数。

锥环传递的转矩为 T_t(N·m)：

$$T_t = F_N\mu\frac{d}{2} = \frac{(F_A - F_0)\mu d}{2(\tan\beta + 2\mu)} \tag{2—5}$$

式中，d 为轴径(m)。

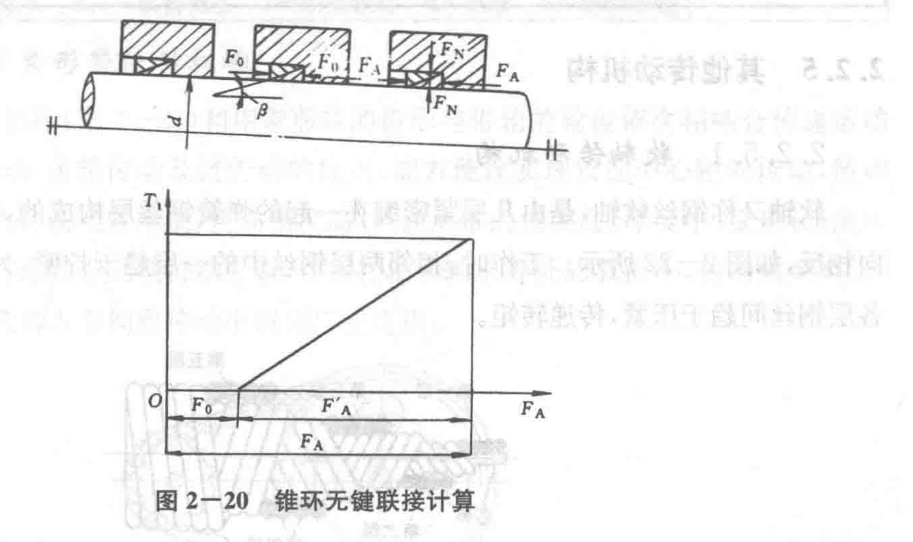


图 2—20　锥环无键联接计算

2. 选择锥环对数

若用 n 对锥环，则各接触面正压力 F_N 将依次等比递减，如图 2—21 所示。所以，n 对锥环能传递的转矩 T_{tn}(N·m)为

$$T_{tn} = T_t\frac{\theta^n - 1}{\theta - 1} \tag{2—6}$$

式中，n 为锥环对数；θ 为接触面正压力递减的公比，$\theta=\dfrac{\tan\beta}{\tan\beta+2\mu}$。定义 $\dfrac{\theta^n-1}{\theta-1}$ 为 n 对锥环转矩增加系数。将所选对数 n、转矩增加系数、在不同摩擦系数时所能传递的转矩关系列于表 2—9，其中 $F_A'=F_A-F_0$ 为锥环工作时所受的轴向负载，β 取 16°40′。

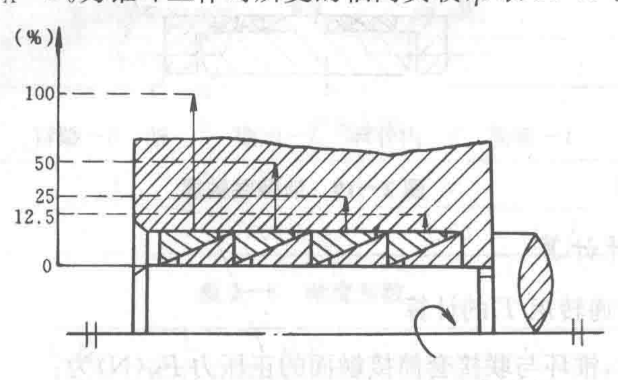


图 2—21　接触面正压力依次递减

表 2—9　锥环对数的选择

对数 n	$\mu=0.12$		$\mu=0.15$	
	$\dfrac{\theta^n-1}{\theta-1}$	T_{tn}	$\dfrac{\theta^n-1}{\theta-1}$	T_{tn}
1	1	$0.111F_A'd$	1	$0.125F_A'd$
2	1.555	$0.173F_A'd$	1.5	$0.188F_A'd$
3	1.86	$0.203F_A'd$	1.75	$0.219F_A'd$
4	2.03	$0.223F_A'd$	1.875	$0.234F_A'd$

2.2.5　其他传动机构

2.2.5.1　软轴传动机构

软轴又称钢丝软轴，是由几层紧密缠在一起的弹簧钢丝层构成的，相邻钢丝层的缠绕方向相反，如图 2—22 所示。工作时，相邻两层钢丝中的一层趋于拧紧，另一层趋于拧松，以使各层钢丝间趋于压紧，传递转矩。

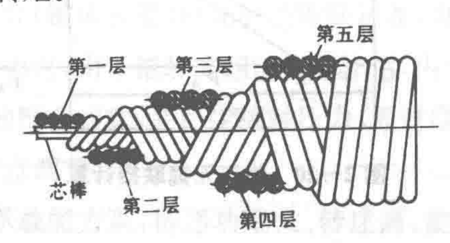


图 2—22　软轴

表 2—10 为常用软轴传动机构的结构形式，该类机构主要用于两个传动机件的轴线不在同一直线上，或工作时彼此要求有相对运动的传动。它可以弯曲地绕过各种障碍件，远距离传递回转运动。适合于受连续冲击的场合，也适用于高速、小转矩的场合，其转速可达

20 000r/min，传递功率不超过 5.5kW，不适于低速大转矩的传动，因为这将使从动轴的转速不均匀，扭转刚度无法保证。

表 2—10 常用软轴传动的结构形式

类型	结构	特点
功率型(G型)软轴	1、8—软轴接头 2、5—软管接头 3—钢丝软轴 4—软管 6—卡箍 7—托架 9—联轴器 10—电动机	钢丝软轴接头端部为固定式(螺纹联接)，软管接头内带滑动轴套(一般用青铜轴套)
控制型(K型)软轴	1—软轴接头 2、6—软管接头 3—联接螺母 4—软管 5—钢丝软轴	钢丝软轴接头端部为滑动式，软管接头为镦压联接(用于解放牌汽车里程表)

2.2.5.2 同步齿形带传动机构

同步齿形带传动机构(图 2—23)利用齿形带的齿形与带轮的轮齿依次相啮合传递运动和动力。它兼有带传动、齿轮传动及链传动的优点，能方便地实现较远中心距的传动，传动过程无相对滑动，平均传动比较准确，传动精度高，且齿形带的强度高、厚度小、重量轻，故可用于低速及高速传动；齿形带无须特别张紧，作用在轴和轴承等处的载荷小，传动效率高，因此在数控机床、工业机器人等伺服传动中得到广泛应用。

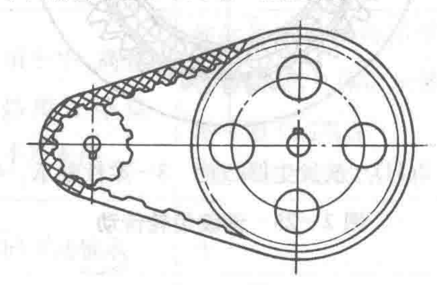
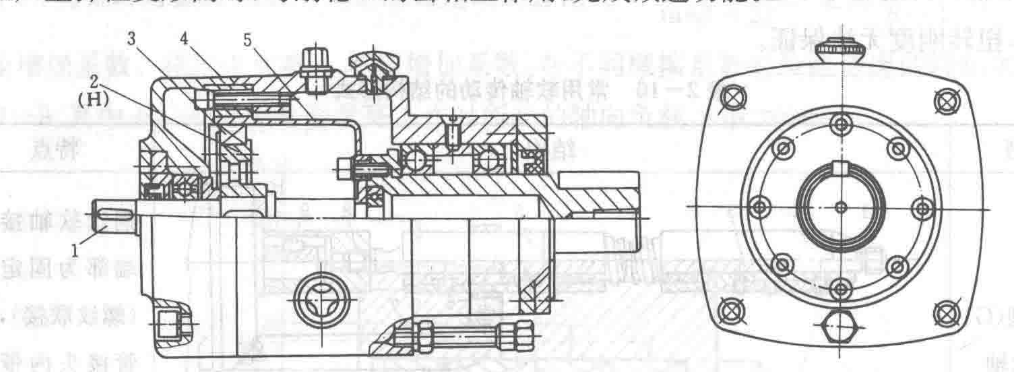


图 2—23 同步齿形带传动

2.2.5.3 谐波齿轮减速器

如图 2—24 所示，波发生器凸轮 2(H)，在高速轴 1 的带动下，经柔性轴承 3 使柔轮 5 的

齿在产生弹性变形同时，与刚轮 4 的齿相互作用，完成减速功能。

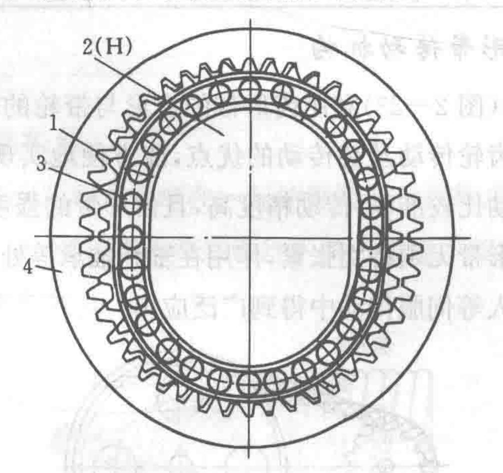


1—轴　2(H)—波发生器凸轮　3—柔性轴承　4—刚轮　5—柔轮

图 2—24　谐波齿轮减速器

谐波齿轮传动的工作原理如图 2—25 所示。圆环形的柔轮 1 在刚轮 4 内，且柔轮的齿数少于刚轮。外装柔性轴承 3 的波发生器凸轮 2(H)装入柔轮 1，使之产生弹性变形而呈椭圆状，长轴两端的齿与刚轮 4 的齿完全啮合，短轴两端的齿与刚轮的齿完全脱开。当刚轮固定，高速轴带动波发生器凸轮和柔性轴承连续转动时，柔轮上原来与刚轮啮合的齿对啮出后脱开，再转向啮入，然后重新啮合，这样柔轮就相对于刚轮沿着与波发生器相反的方向低速旋转，通过低速轴输出。若将柔轮固定，由刚轮输出低速运动，原理相同，只是刚轮的转向与波发生器的转向相同。

该机构传动的侧隙小，空程小，传动精度高，体积小，噪声低，因此广泛用于各种机电一体化产品中，如机器人、机床、仪器仪表、雷达、通信设备等。



1—柔轮　2(H)—波发生器凸轮　3—柔性轴承　4—刚轮

图 2—25　谐波齿轮传动

2.3 支承部件设计

常用的支承部件主要有轴承、导轨和机身(或基座)等。它们的精度、刚度、抗振性、热稳

定性等因素直接影响伺服系统的精度、动态特性和可靠性。因此，机电一体化系统对支承部件的要求是：精度高、刚度高、热变形小、抗振性好、可靠性高，并且有良好的摩擦特性和结构工艺性。

2.3.1 回转运动支承设计

2.3.1.1 概述

回转运动支承主要指滚动轴承，动、静压轴承，磁轴承等各种轴承。它的作用是支承作回转运动的轴或丝杠。随着刀具材料和加工自动化的发展，主轴的转速越来越高，变速范围也越来越大，如中型数控机床和加工中心的主轴最高转速可达到5 000～6 000r/min，甚至更高。内圆磨床为了达到足够的磨削速度，磨削小孔的砂轮主轴转速已高达240 000r/min。因此，机电一体化系统对轴承的精度、承载能力、刚度、抗振性、寿命、转速等提出了更高的要求，也逐渐出现了许多新型结构的轴承。

机电一体化系统中常用的轴承及其特点如表2—11所示。

表2—11 机电一体化系统中常用的轴承及其特点

种类性能	滚动轴承		静压轴承	动压轴承	磁轴承
	一般滚动轴承	陶瓷轴承			
精度	一般，在预紧无间隙时较高（1～1.5μm）	同滚动轴承，1μm	高，液体静压轴承可达0.1μm，气体静压轴承可达0.02～0.12μm，精度保持性好	较高，单油楔0.5μm，双油楔0.08μm	一般，1.5～3μm
刚度	一般，预紧后较高，并取决于所用轴承形式	不及一般滚动轴承	液体静压轴承高，气体静压轴承较差	液体动压轴承较高	不及一般滚动轴承
抗振性	较差，阻尼比$\xi=0.02\sim0.04$	同滚动轴承	好	较好	较好
速度性能	用于低、中速，特殊轴承可用于较高速	用于中、高速，热传导率低，不易发热	液体静压轴承可用于各种速度，气体静压轴承可用于超高速（80 000～160 000r/min）	用于高速	用于高速 30 000～50 000r/min
摩擦损耗	较小，$\mu=0.002\sim0.008$	同滚动轴承	小	启动时较大	很小
使用寿命	疲劳强度较低	较长	长	长	长
制造难易	轴承生产专业化、标准化	比滚动轴承难	自制，工艺要求高。需供油或供气系统	自制，工艺要求高	较复杂

续表

种类性能	滚动轴承		静压轴承	动压轴承	磁轴承
	一般滚动轴承	陶瓷轴承			
使用维修	简单，用油脂润滑	较难	液体静压轴承的供油系统清洁较难。气体静压轴承的供气系统清洁度要求高，但使用维修容易	比较简单	较难
成本	低	较高	较高	较高	高

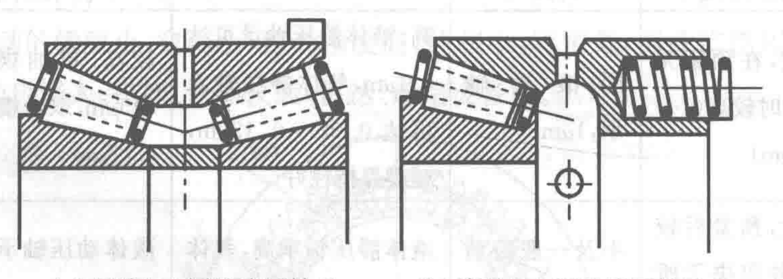
2.3.1.2 *滚动轴承*

1.标准滚动轴承

标准滚动轴承的尺寸规格已标准化、系列化，由专门生产厂大量生产。使用时，主要根据刚度和转速来选择。如有要求，则还应考虑其他因素，如承载能力、抗振性和噪声等。

近年来，为适应各种不同的要求，还开发了不少用于机电一体化系统的新型轴承，下面仅介绍其中的两种。

(1)空心圆锥滚子轴承。图 2—26 所示为双列和单列空心圆锥滚子轴承。一般将双列[见图 2—26(a)]的轴承用于前支承，单列[见图 2—26(b)]的轴承用于后支承，配套使用。



(a)双列空心圆锥滚子轴承　(b)单列空心圆锥滚子轴承

图 2—26　空心圆锥滚子轴承

这种轴承与一般圆锥滚子轴承不同之处在于：滚子是中空的，保持架则是整体加工的，它与滚子之间没有间隙，工作时润滑油的大部分将被迫通过滚子中间的小孔，以便冷却最不易散热的滚子，润滑油的另一部分则在滚子与滚道之间通过，起润滑作用。此外，中空的滚子还具有一定的弹性变形能力，可吸收一部分振动。双列轴承的两列滚子数目相差一个，使两列的刚度变化频率不同，以抑制振动。单列轴承外圈上的弹簧用做预紧。这两种轴承的外圈较宽，因此与箱体孔的配合可以松一些。箱体孔的圆度和圆柱度误差对外圈滚道的影响较小。这种轴承用油润滑，故常用于卧式主轴。

(2)陶瓷滚动轴承。陶瓷滚动轴承的结构与一般滚动轴承相同，目前常用的陶瓷材料为 Si_3N_4。陶瓷轴承与钢轴承材料的特性如表 2—12 所示。由于陶瓷的热传导率低、不易发热、硬度高、耐磨，因而：在采用油脂润滑的情况下，轴承内径在 25～100mm 时，主轴转速可

达 8 000～15 000r/min；在油雾润滑的情况下，轴承内径在 65～100mm 时，主轴转速可达 15 000～20 500r/min；轴承内径在 40～60mm 时，主轴转速可达 20 000～30 000r/min。陶瓷滚动轴承主要用于中、高速运动的主轴的支承。

表 2—12 陶瓷轴承与钢轴承材料的特性

项目	陶瓷(Si_3N_4)	钢球	比值
密度/$(g/cm)^3$	3.21	7.85	0.41
线膨胀系数/(1/℃)	3.2×10^{-6}	12.5×10^{-6}	0.26
纵向弹性系数/MPa	$3.2\times10^4(3.14\times10^4)$	$2.1\times10^4(2.06\times10^4)$	1.52
泊松比	0.26	0.30	0.37
热传导率/(W/m·K)	20～35	41.87	—
硬度(常温下)/HBW	1 800～2 000	700～800	—
耐热温度/℃	800	120	—
耐蚀性	大	小	—
磁性	非磁性	非磁性	—

2. 非标准滚动轴承

当对轴承有特殊要求而又不可能采用标准滚动轴承时，就需根据使用要求自行设计非标准滚动轴承。

(1)微型滚动轴承。如图 2—27 所示为微型向心推力轴承，它具有杯形外圈，$D\geqslant 1.1$mm，但没有内环，锥形轴颈直接与滚珠接触，由弹簧或螺母调整轴承间隙。

当 $D>4$mm 时，可有内环，如图 2—28(a)所示，采用碟形垫圈来消除轴承间隙。图 2—28(b)所示的轴承内环可以与轴一起从外环和滚珠中取出，装拆比较方便。

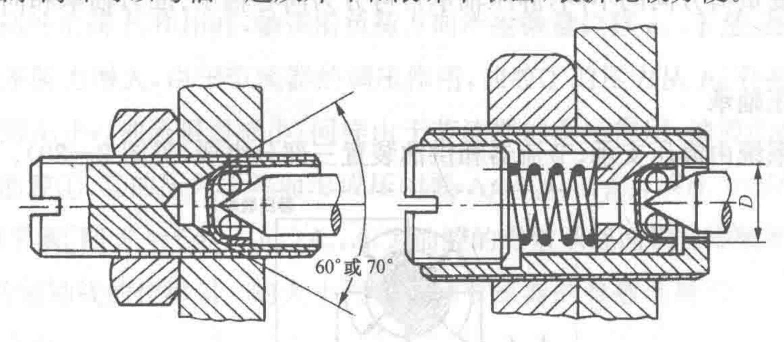
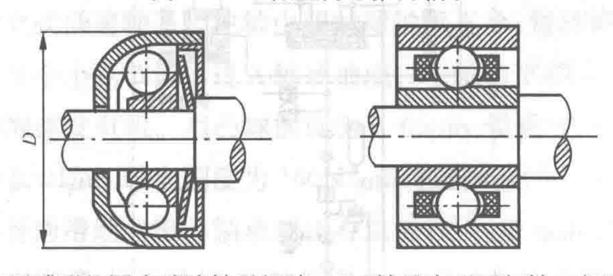
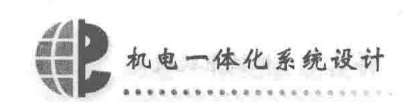


图 2—27 微型向心推力轴承

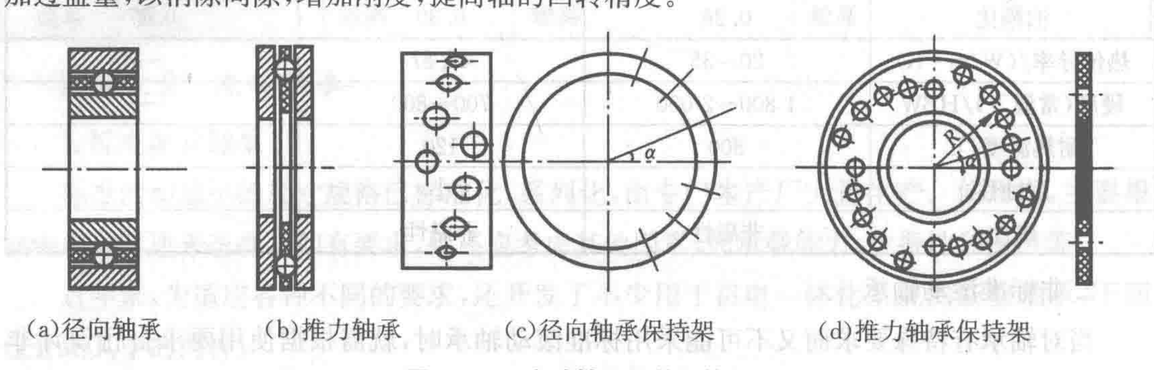


(a)用碟形垫圈来消除轴承间隙 (b)轴承内环可与轴一起取出

图 2—28 微型滚动轴承



(2)密珠轴承。密珠轴承是一种新型的滚动摩擦支承，它由内、外圈和密集于两者间并具有过盈配合的钢珠组成。它有两种形式，如图 2—29 所示，即径向轴承[见图 2—29(a)]和推力轴承[见图 2—29(b)]。密珠轴承的内外滚道和止推面分别是形状简单的外圆柱面、内圆柱面和平面，在滚道间密集地安装有滚珠。滚珠在其尼龙保持架的空隙中以近似多头螺旋线的形式排列，如图 2—29(c)、(d)所示。每个滚珠公转时均沿着自己的滚道滚动而互不干扰，以减少滚道的磨损。密集的滚珠还有助于减小滚珠几何误差对主轴轴线位置的影响，具有误差平均效应，有利于提高主轴精度。滚珠与内、外圈之间保持 0.005～0.012mm 的预加过盈量，以消除间隙，增加刚度，提高轴的回转精度。



(a)径向轴承　(b)推力轴承　(c)径向轴承保持架　(d)推力轴承保持架

图 2—29　密珠轴承及其保持架

2.3.1.3　静压轴承

静压轴承是流体摩擦支承的基本类型之一，它是在轴颈与轴承之间充有一定压力的液体或气体，将转轴浮起并承受负荷的一种轴承。

按支承承受负荷方向的不同，静压轴承常可分为向心轴承、推力轴承和向心推力轴承三种形式。

1. 液体静压轴承

液体静压系统由静压支承、节流器和供油装置三部分组成(见图 2—30)。

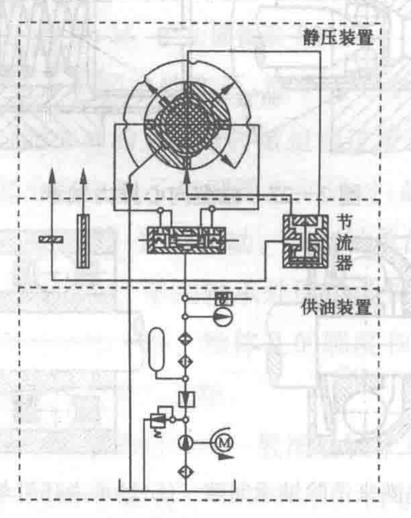
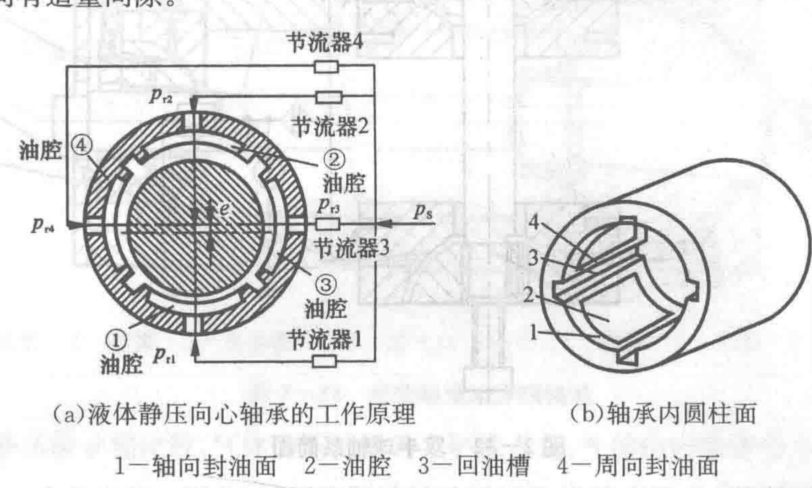


图 2—30　静压支承系统的组成

液体静压向心轴承的工作原理如图2—31(a)所示，在图2—31(b)所示的轴承内圆柱面上，对称地开有4个矩形油腔，油腔与油腔之间开有回油槽，油腔与回油槽之间的圆弧面称为周向封油面，轴承两端面和油腔之间的圆弧面称为轴向封油面。轴装入轴承后，轴承封油面与轴颈之间有适量间隙。



(a)液体静压向心轴承的工作原理　　(b)轴承内圆柱面

1—轴向封油面　2—油腔　3—回油槽　4—周向封油面

图2—31　液体静压向心轴承的工作原理

液压泵输出的压力油通过4个节流器后，油压降至p_r并分别流进各节流器所对应的油腔，在油腔内形成静压，从而使轴颈和轴承表面被油膜分开，然后经封油面上的间隙和回油槽流回油池。

空载时，由于各油腔与轴颈间的间隙h_0相同，4个油腔的压力均为p_{r0}。此时，转轴受到各油腔的油压作用而处于平衡状态，轴颈与轴承同心(忽略转轴部件的自重)。

当支承受到外负荷F_r作用时，轴颈沿负荷方向产生微量位移e。于是，油腔①的间隙减小为h_0-e，油流阻力增大，由于节流器的调压作用，油腔①的压力从p_{r0}升高到p_{r1}；油腔②的间隙则增大到h_0+e，油流阻力减小；同样由于节流器的调压作用，油腔②的压力从p_{r0}降至p_{r2}。因此，油腔①、②的压力不等而形成压力差$\Delta p=p_{r1}-p_{r2}$，该压力差作用在轴颈上，与外负荷F_r相平衡[即$F_r=(p_{r1}-p_{r2})A_e$，A_e为油腔的有效承载面积]，使轴颈稳定在偏心量e的位置上。转轴轴线的位移量e的大小与支承和节流器的参数选择有关，若选择合适，可使转轴的位移很小。

图2—32所示为立式低速轴系。主轴由两对球轴承支承，每对轴承有8个油腔。具有一定压力的油液经过8个小孔节流器进入轴承油腔。主轴由下端的力矩电动机驱动，主轴上安装有高灵敏度的测速发电机。当凸球圆度为0.05μm，供油压力为1MPa时，主轴的径向和轴向回转精度为0.01μm，轴向刚度为160N/μm，径向刚度为100N/μm。

液体静压轴承与普通滑动和滚动轴承相比有以下特点：摩擦阻力小、传动效率高、使用寿命长、转速范围广、刚度高、抗振性好、回转精度高；能适应不同负荷，满足不同转速的大型或中、小型机械设备的要求；但需有一套可靠的供油装置，将增大设备占用的空间和设备

质量。

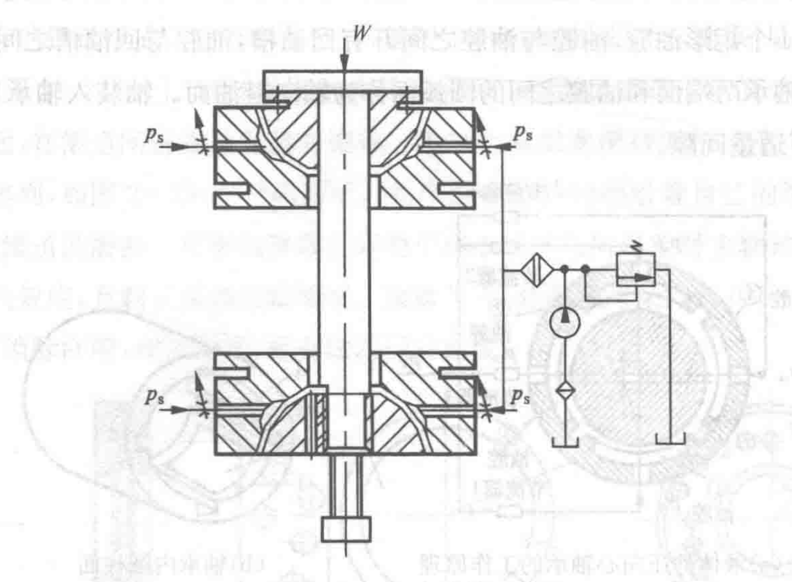
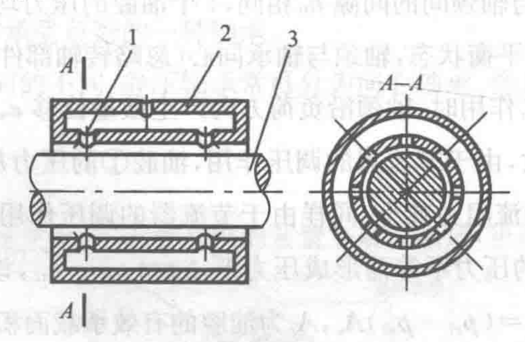


图 2—32　双半球轴系简图

2. 气体静压轴承

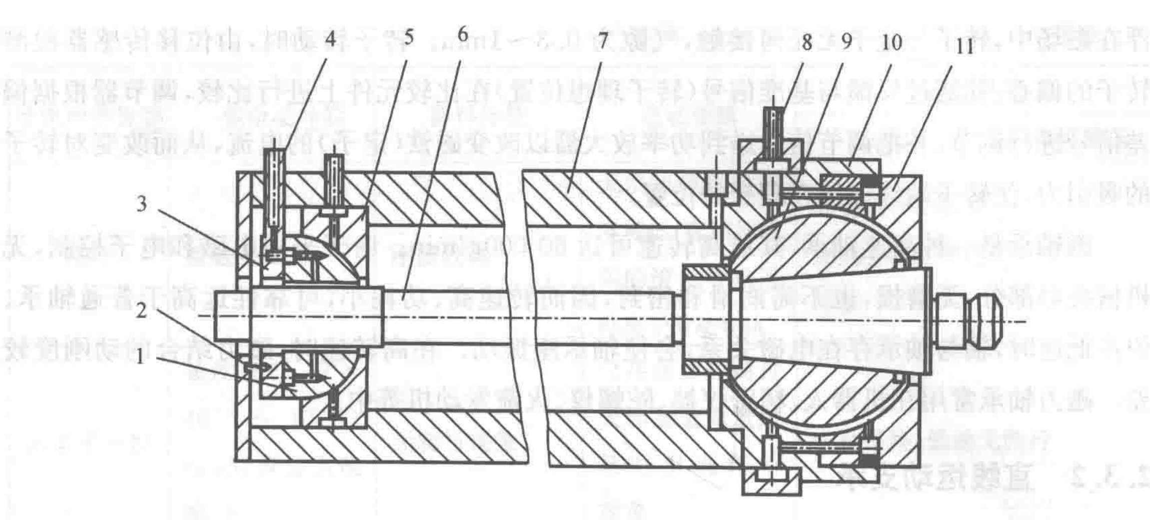
图 2—33 所示为气体静压向心轴承简图。由专门的供气装置输出的压缩气体进入轴承的圆柱容腔，并通过沿轴承圆周均匀分布、与端面有一定距离的两排进气孔（又称节流孔），进入轴与轴承之间的间隙，然后沿轴向流至轴承端部，并由此排入大气。气体静压轴承的工作原理与液体静压轴承相同。



1—进气孔　2—轴承　3—轴

图 2—33　气体静压向心轴承

图 2—34 所示为美国超精车床的球轴承。主轴的右端固定着直径为 70mm、长为 60mm 的凸球。具有一定压力的气体从凹球 10、11 的 12 个小孔节流器（其直径为 0.3mm）进入球轴承间隙（12μm），使主轴浮起，并承受一定的轴向和径向载荷。主轴左端是长 27mm、直径为 22mm 的圆柱径向轴承，气体同样通过 12 个小孔节流器进入轴承间隙（18μm）。当主轴转速为 200r/min 时，主轴径向振摆为 0.03μm，轴向窜动为 0.01μm，径向刚度为 25N/μm，轴向刚度为 80N/μm。当用金刚石刀具加工铝和铜件时，可获得 Ra0.01～0.02μm 的无划痕镜面。



1—圆柱径向轴套　2—弹簧　3—支承板　4、8—进气口　5、10、11—凹球　6—主轴　7—壳体　9—凸球

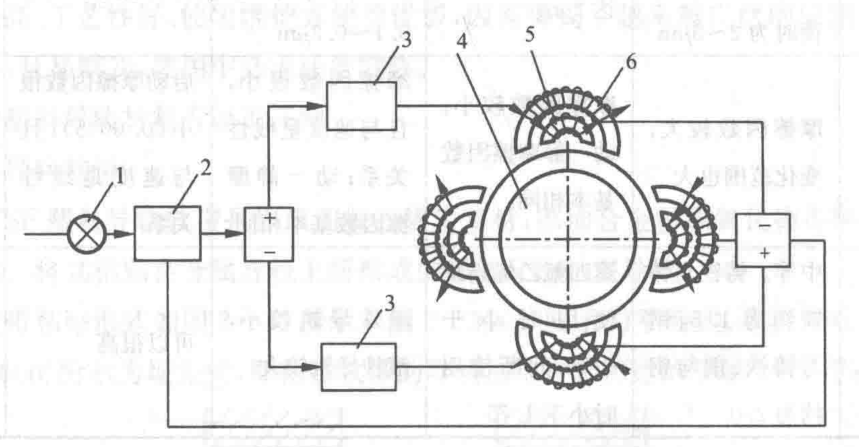
图 2—34　美国超精车床球轴承

与液体静压轴承相比较，气体静压轴承的主要优点是：气体的内摩擦很小、黏度极低，故摩擦损失极小，不易发热。因此，适用于要求转速极高和灵敏度要求高的场合；又由于气体的理化性高度稳定，因而可在支承材料许可的高温、深冷、放射性等恶劣环境中正常工作；若采用空气静压轴承，则空气来源十分方便，对环境无污染，循环系统较液体静压轴承简单。它的主要缺点是：负荷能力低；支承的加工精度和平衡精度要求高，所需气体的清洁度要求较高，需严格过滤。

2.3.1.4　*磁轴承*

磁轴承主要由两部分组成：轴承本身及其电气控制系统。磁轴承分向心轴承和推力轴承两类，它们都由转子和定子组成，其工作原理相同。

图 2—35 所示为向心磁轴承的原理图。



1—比较元件　2—调节器　3—功率放大器　4—转子　5—位移传感器　6—电磁铁

图 2—35　向心磁轴承的原理图

定子上安装有电磁铁，转子的支承轴颈处装有铁磁环，定子电磁铁产生的磁场使转子悬

浮在磁场中，转子与定子无任何接触，气隙为 0.3～1mm。转子转动时，由位移传感器检测转子的偏心，并通过反馈与基准信号（转子理想位置）在比较元件上进行比较，调节器根据偏差信号进行调节，并把调节信号送到功率放大器以改变磁铁（定子）的电流，从而改变对转子的吸引力，使转子始终保持在理想的位置。

磁轴承是一种高速轴承，其最高转速可达 60 000r/min。由于采用电磁和电子控制，无机械接触部分，无磨损，也不需润滑和密封，因而转速高、功耗小，可靠性远高于普通轴承。但在低速时，轴与轴承存在电磁关系，会使轴承座振动。在高转速时，磁力结合的动刚度较差。磁力轴承常用在机器人、精密仪器、陀螺仪、火箭发动机等中。

2.3.2 直线运动支承

2.3.2.1 概述

直线运动支承主要是指直线运动导轨副，它的作用是保证所支承的各部件（如工作台、尾座等）的相对位置和运动精度。因此，对导轨副的基本要求是：导向精度高、刚度大、耐磨、运动灵活和平稳。

机电一体化系统中常用的导轨有滑动导轨、滚动导轨和静压导轨。它们的特点如表 2—13 所示。

表 2—13 常用导轨及其特点

导轨种类性能	一般滑动导轨	塑料导轨	滚动导轨	静压导轨	
				液体静压	气体静压
定位精度	一般。位移误差为 10～20μm，用防爬油或液压卸荷时为 2～5μm	较高。用聚四氟乙烯时，位移可达 2μm	高。传动刚度大于 30～40N/μm 时，位移误差为 0.1～0.3μm	较高。位移误差可达 2μm	高。位移误差可达 0.125μm
摩擦特性	摩擦因数较大，变化范围也大	摩擦因数较小；动一静摩擦因数基本相同	摩擦因数很小，且与速度呈线性关系；动一静摩擦因数基本相同	启动摩擦因数很小（0.0005），且与速度是线性关系	摩擦因数小于液体静压导轨摩擦因数
承载能力/（N/mm^2）	中等。铸铁与铸铁约为 1.5，钢与铸铁、钢与钢约为 2.0	聚四氟乙烯连续使用时小于 0.35；间断使用时小于 1.75	滚珠导轨较小，滚柱导轨较大	可以很高	承载能力小于液体静压导轨

续表

导轨种类性能	一般滑动导轨	塑料导轨	滚动导轨	静压导轨	
				液体静压	气体静压
刚度	接触刚度高	刚度较高	无预加载荷时刚度较低;有预加载荷的滚动导轨可略高于滑动导轨	间隙小时刚度高,但不及滑动导轨	刚度低
运动平稳性	速度在($1.67\times10^{-5}\sim10^{-3}$)m/s时容易出现爬行	无爬行现象	仅在预加载荷过大和制造质量过低时出现爬行现象	运动平稳,低速无爬行	
抗震性	一般	吸振	抗振性和抵抗冲击载荷的能力较差	吸振性好	
寿命	非淬火铸铁低,淬火或耐磨铸铁中等,淬火钢高	高	防护很好时高	很高	
速度	中、高	中等	任意	低、中等	

金属一金属型滑动导轨目前在数控机床等机电一体化产品中使用较少。因为这些导轨的静摩擦系数大,动一静摩擦系数的差值也大,容易出现低速爬行,因而不能满足伺服系统对快速响应性、运动精度和运动平稳性等的要求。

2.3.2.2 塑料导轨

塑料导轨是在滑动导轨上镶装塑料而成的。这种导轨除表2—13所述优点外,还具备化学稳定性高、工艺性好、使用维护方便等优势,因而得到了越来越广泛的应用。但这种导轨耐热性差,且易蠕变,使用中必须注意散热。

常用的塑料导轨材料有以下三种。

1.塑料导轨软带

国产TSF塑料导轨软带是以聚四氟乙烯为基材,添加合金粉和氧化物等所构成的高分子复合材料。将其粘贴在金属导轨上所形成的导轨又称贴塑导轨。

导轨软带粘贴形式如图2—36所示。图2—36(a)所示为平面式,多用于设备的导轨维修;图2—36(b)所示为埋头式,即粘贴软带的导轨加工有带挡边的凹槽,多用于新产品。

(a)平面式　　(b)埋头式

图2—36 导轨软带粘贴形式

这种软带可与铸铁或钢组成滑动摩擦副，也可以与滚动导轨组成滚动摩擦副。

2.金属塑料复合导轨板

这种导轨板分3层，如图2—37所示。内层为钢带，以保证导轨板的机械强度和承载能力。钢带上有镀烧结成球状的青铜粉或青铜丝网形成的多孔中间层，并浸渍了聚四氟乙烯等塑料填料。中间层可以提高导轨的导热性，避免浸渍进入孔或网中的氟塑料产生冷流和蠕变。当青铜与配合面摩擦而发热时，热膨胀系数远大于金属的塑料从中间层的孔隙中挤出，向摩擦表面转移，形成厚0.01～0.05mm的表面自润滑塑料层。这种导轨板一般用胶粘贴在金属导轨上，成本比聚四氟乙烯软带高。图2—38所示为某铣床燕尾导轨镶条上安装金属塑料复合导轨板的示意图。

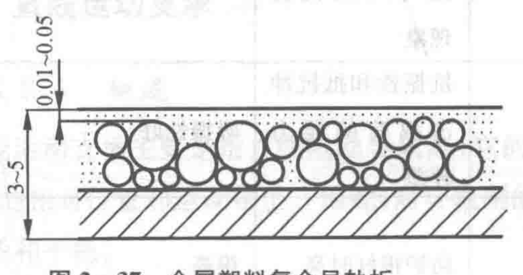


图2—37　金属塑料复合导轨板

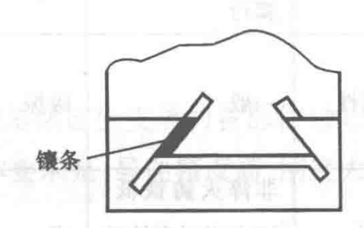


图2—38　金属塑料复合导轨板的应用

3.塑料涂层

在导轨副中，若只有一面磨损严重，则可以把磨损部分切除，涂敷配制好的胶状塑料涂层，利用模具或另一摩擦面使涂层成形，固化后的塑料涂层即成为摩擦副中的配对面之一，与另一金属配对面形成新的摩擦副。目前常用的塑料涂层材料有环氧涂料和含氟涂料。它们都以环氧树脂为基体，但所用牌号和加入的成分有所不同。环氧涂料的优点是摩擦系数小且稳定，防爬性能好，有自润滑作用。其缺点是不易存放，且黏度逐渐变大。含氟涂料则克服了上述缺点。

这种方法主要用于导轨的维修和设备的改造，也可用于新产品。

2.3.2.3　滚动导轨

滚动导轨是在做相对运动的两导轨面之间加入滚动体，变滑动摩擦为滚动摩擦的一种直线运动支承。

1.滚动导轨的特点

(1)降低摩擦阻力。在滚动直线导轨副中，滑块与导轨之间放入了适当的钢球，使滑块与导轨之间的滑动摩擦变为滚动摩擦，大大降低了两者之间的运动摩擦阻力。

(2)承载能力大。其滚道采用圆弧形式，增大了滚动体与圆弧滚道接触面积，从而大大地提高了导轨的承载能力，可达到平面滚道形式的13倍。

(3)刚度大。在该导轨制作时，常需要预加载荷，这使导轨系统刚度得以提高。

(4)使用寿命长。由于是纯滚动，摩擦系数为滑动导轨的1/50左右，磨损小，因而使用

寿命长，功耗低。

(5)成对使用导轨副时，具有“误差均化效应”。

(6)传动平稳可靠。由于摩擦力小、动作轻便，因而定位精度高，微量移动灵活、准确。

(7)具有结构自调整能力。装配调整容易，因此降低了对配件加工精度的要求。

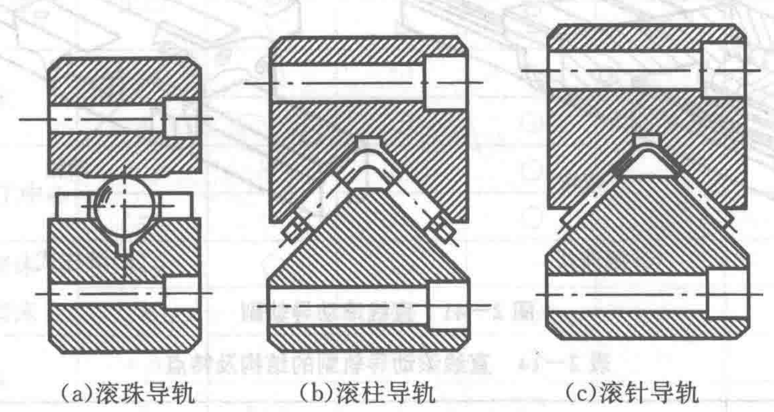
(8)导轨采用表面硬化处理，使导轨表面具有良好的耐磨性，心部保持良好的力学性能。

(9)简化了机械结构的设计和制造。

2. 分类

(1)按滚动体形状不同分类，可分为滚珠导轨、滚柱导轨、滚针导轨三种，如图 2－39 所示。

图 2－39(a)所示为滚珠导轨，采用点接触形式，摩擦力小，灵敏度高，但承载能力小、刚度低，适用于载荷不大、行程较小，而运动灵敏度要求较高的场合。图 2－39(b)所示为滚柱导轨，采用线接触形式，其承载能力和刚度都比滚珠导轨大，适用于载荷较大的场合，但制造安装要求高。滚柱结构有实心和空心两种。空心滚柱在载荷作用下有微小变形，可减小导轨局部误差和滚柱尺寸对运动部件导向精度的影响。图 2－39(c)所示为滚针导轨，其尺寸小、结构紧凑、排列密集、承载能力大，但摩擦力较大，精度较低，适用于载荷大导轨尺寸受限制的场合。

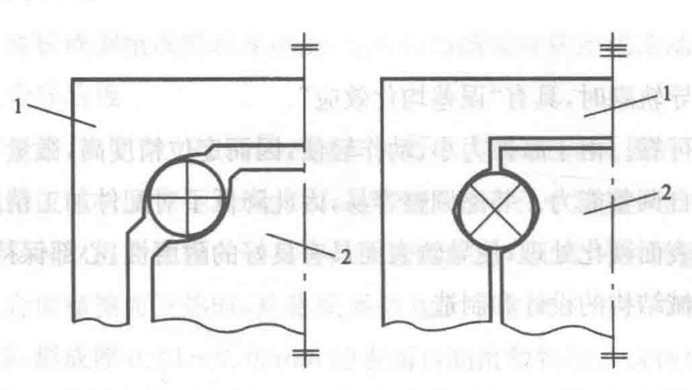


(a)滚珠导轨　(b)滚柱导轨　(c)滚针导轨

图 2－39　滚动导轨结构形式

(2)按滚动体的循环方式分类，又可分为滚动体不循环式导轨和滚动体循环式导轨两种。

(3)按滚道沟槽形状分类，有单圆弧和双圆弧两种，如图 2－40 所示。单圆弧沟槽为两点接触，如图 2－40(a)所示。双圆弧沟槽为四点接触，如图 2－40(b)所示。前者运动摩擦和安装基准的平均作用比后者要小，但其静刚度比后者稍差。



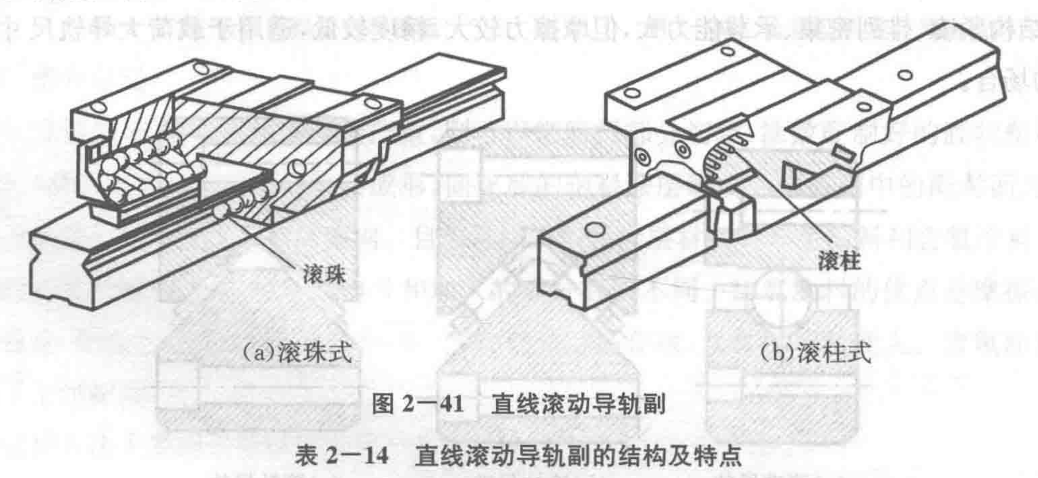
(a)单圆弧沟槽　　(b)双圆弧沟槽

1—滑座　2—导轨

图 2—40　滚道沟槽形状

3. 直线滚动导轨副

直线滚动导轨副的结构如图 2—41 所示。它由导轨和滑块组成，滑块的数量可根据需要而定。当滑块移动时，滚珠在滚道内循环运动。目前，国内常用的两种直线滚动导轨副的结构及特点如表 2—14 所示。



(a)滚珠式　　(b)滚柱式

图 2—41　直线滚动导轨副

表 2—14　直线滚动导轨副的结构及特点

导轨截面形状	梯形	矩形
滚珠接触的结构形式	θ	θ = 0°　45°　45°

续表

导轨截面形状	梯形	矩形
能承受的载荷的方向和大小		
特性	能承受较大的竖直向下载荷； 对竖直向下载荷的精度稳定性好； 运行噪声小	上、下、左、右四方均能承受较大的载荷； 刚度高
用途	电加工机床、各种检测仪器、$X-Y$ 工作台等	加工中心、数控机床、机器人等

(1)精度等级。直线滚动导轨副精度等级不宜选择得过高，以降低成本。表 2－15 所示为对各种机械推荐采用的精度等级。

表 2－15　推荐采用的精度等级

机床及机械类型		坐标	精度等级					
			C	D	E	F	G	H
数控机床	车床	x	○	○	○	—	—	—
		z	—	○	○	○	—	—
	铣床、加工中心	x、y	—	○	○	—	—	—
		z	—	—	○	○	—	—
	坐标镗床 坐标磨床	x、y	○	○	—	—	—	—
		z	—	○	○	—	—	—
	磨床	x、y	—	○	○	—	—	—
		z	—	—	○	○	—	—
	电加工铣床	x、y	○	○	○	—	—	—
		z	—	○	○	○	—	—
	精密冲裁机	x、z	—	—	○	○	—	—
	绘图仪	x、z	—	○	○	—	—	—
	精密十字工作台	x、z	—	○	○	—	—	—
普通机床		x、y	—	—	○	○	○	—
		z	—	—	—	○	○	○
通用机械			—	—	—	○	○	○

(2)设计计算。循环式直线滚动导轨副的承载能力用额定动载荷 C_a 和额定静载荷 C_{oa} 表示。其额定寿命 L 为

$$L=\frac{2\times l_s\times n_z\times 60\times L_h}{10^3}$$

式中：L——额定寿命(km)；

l_s——行程长度(m)；

n_z——每分钟往返次数；

L_h——单位额定寿命(h)。

额定寿命 L 与额定动载荷 C_a 的关系可表示为

$$L=\left(\frac{f_h f_t f_c f_a}{f_w}\frac{C_a}{P}\right)^{\varepsilon}K$$

式中：C_a——额定动载荷(kN)；

P——实际工作载荷(kN)；

ε——指数，滚珠 $\varepsilon=3$，滚子 $\varepsilon=10/3$；

K——额定寿命单位，滚珠 $K=50\text{km}$，滚子 $K=100\text{km}$；

f_h——硬度系数，$f_h=\left(\frac{\text{滚道实际硬度}}{58}\right)^{3.6}$；

f_t——温度系数，查表 2－16；

f_c——接触系数，查表 2－17；

f_a——精度系数，查表 2－18；

f_w——载荷系数，查表 2－19。

表 2－16 温度系数 f_t

工作温度/℃	f_t
≤100	1.00
＞100～150	0.90
＞150～200	0.73
＞200～250	0.60

表 2－17 接触系数 f_c

每根导轨上的滑块数	f_c
1	1.00
2	0.81
3	0.72
4	0.66
5	0.61

表 2—18　精度系数 f_a

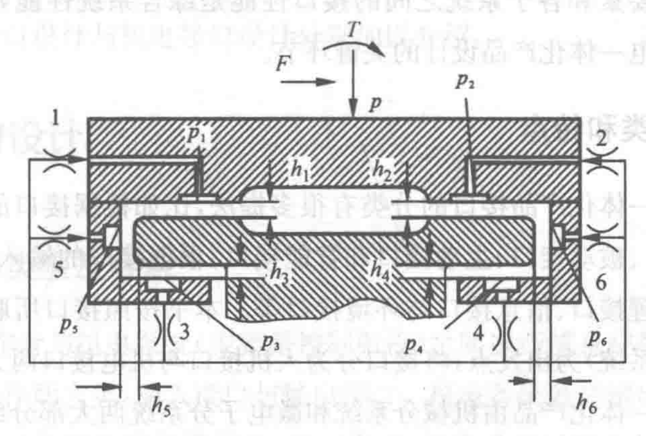
精度系数	C	D	E	F	G	H
f_a	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7

表 2—19　载荷系数 f_w

工作条件	f_w
无外部冲击或振动的低速运动场合，速度小于 15m/min	1～1.5
无明显冲击或振动的中速运动场合，速度小于 60m/min	1.5～2
有外部冲击或振动的高速运动场合，速度大于 60m/min	2～3.5

2.3.2.4　静压导轨

静压导轨的工作原理与静压轴承类似。在两导轨面之间通入具有压力的液体或气体介质，使两导轨面脱离接触。动导轨悬浮在压力油或气体之上运动，摩擦力极小。当受外载作用后，介质压力会因反馈升高，从而承受外载荷。静压导轨有开式和闭式两种，图 2—42 所示为闭式液体静压导轨的工作原理图。当工作台受力 P 作用而下降，使间隙 h_3、h_4 增大，h_1、h_2 减小，则流经节流器 3、4 的流量减小，压力降也减小，使油腔压力 p_3、p_4 升高。流经节流器 1、2 的流量增大，p_1、p_2 降低。4 个油腔产生向上的支承合力，使工作台稳定在新的平衡位置。若工作台受颠覆力矩 T 的作用，使 h_1、h_4 增大，h_2、h_3 减小，则 4 个油腔产生反力矩；若工作台受水平力 F 的作用，则 h_5 减小，h_6 增大，左右油腔产生与 F 相反的支承反力。这些都使工作台受载后稳定在新的平衡位置。若只有节流器 1、2，则成为开式静压导轨，不能承受颠覆力矩。



1、2、3、4、5、6—节流器

图 2—42　液体静压导轨工作原理

在使用静压导轨时，必须保持油液或空气清洁，并且注意防止机械使用处温度的剧烈变化，以免引起液体静压导轨油液黏度变化和气体静压导轨空气压力变化。静压导轨还应有良好的防护措施。

第3章 接口设计

3.1 概 述

3.1.1 接口设计的重要性

机电一体化技术是利用微电子技术,赋予机械系统“智能”,使其具有更高的自动化程度,最大限度地发挥机械能力的一种技术。一个机电一体化产品由机械分系统和微电子分系统(控制微机)两大部分组成,二者又分别由若干要素构成。要将各要素、各子系统有机地结合起来,构成一个完整的系统,就必须能顺利地在各要素、各子系统之间进行物质、能量和信息的传递与交换。为此,各要素和子系统的相接处必须具备一定的联系条件,这个联系条件通常被称为接口。因此也可以把机电一体化产品看成是由许多接口将组成产品的各要素的输入/输出联系为一体的系统。在某种意义上讲,机电一体化产品的设计,就是在根据功能要求选择了各要素后,所进行的接口设计。从这一观点出发,机电一体化产品的性能取决于接口的性能,即各要素和各子系统之间的接口性能是综合系统性能好坏的决定性因素。因此,接口设计是机电一体化产品设计的关键环节。

3.1.2 接口的分类和特点

目前,关于机电一体化产品接口的分类有很多提法,比如根据接口的变换和调整功能,可将接口分为零接口、被动接口、主动接口和智能接口;根据接口的输入/输出功能,可将接口分为机械接口、物理接口、信息接口与环境接口等。本书按照接口所联系的子系统不同,以控制微机(微电子系统)为出发点,将接口分为人机接口与机电接口两大类。

如前所述,机电一体化产品由机械分系统和微电子分系统两大部分组成,各分系统又由若干要素组成,如图 3—1 所示。

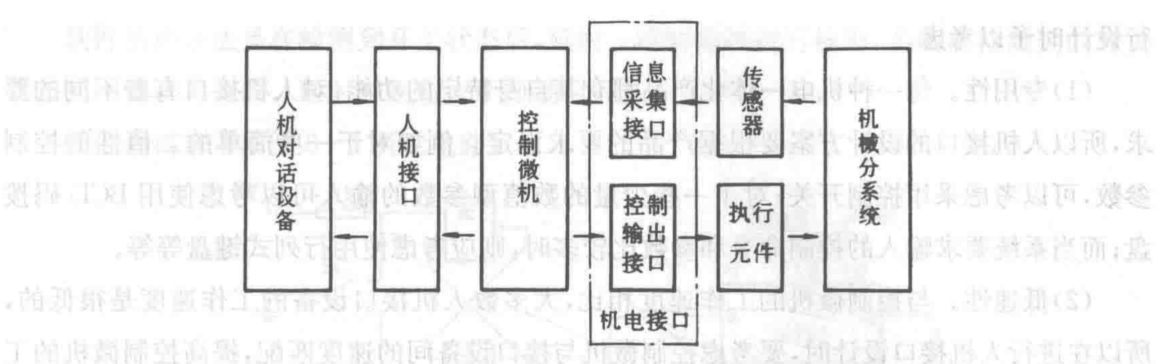


图 3—1　机电一体化系统的基本组成

由于机械系统与微电子系统在性质上有很大差别，二者之间的联系必须通过机电接口进行调整、匹配、缓冲，因此机电接口有着重要的作用。另外，尽管微电子技术的应用使机械系统具有了“智能”，达到了更高的自动化程度，但是机电一体化系统的运行仍离不开人的干预，必须在操作者的监控下进行，因此，人机接口也是机电一体化产品必不可少的。鉴于上述，本章将主要介绍机电一体化设计中经常遇到的机电接口和人机接口的设计，对于机械分系统和微电子分系统内部的各种接口设计不作具体介绍。

在机电接口中，按照信息和能量的传递方向，又可分为信息采集接口（传感器接口）与控制输出接口。控制微机通过信息采集接口接受传感器输出信号，检测机械系统运行参数，经过运算处理后，发出有关控制信号，经过控制输出接口的匹配、转换、功率放大，驱动执行元件来调节机械系统的运行状态，使其按要求动作。

人机接口包括输出接口与输入接口两类，通过输出接口，操作者对系统的运行状态、各种参数进行监测；通过输入接口，操作者向系统输入各种命令及控制参数，对系统运行进行控制。

下面，对人机接口设计与机电接口设计分别加以介绍。

3.2　人机接口设计

3.2.1　人机接口类型及特点

人机接口是操作者与机电系统（主要是控制微机）之间进行信息交换的接口。按照信息的传递方向，可以分作两大类：输入接口与输出接口。机电系统通过输出接口向操作者显示系统的各种状态、运行参数及结果等信息；另一方面，操作者通过输入接口向机电系统输入各种控制命令，干预系统的运行状态，以实现所要求完成的任务。

在机电一体化产品中，常用的输入设备有控制开关、BCD 二一十进制码拨盘、键盘等；常用的输出设备有状态指示灯、发光二极管显示器、液晶显示器、微型打印机、阴极射线管显示器等，扬声器作为一种声音信号输出设备，在进行产品设计时经常被采用。

人机接口作为“人”与“机”之间进行信息传递的通道，有着其自身的一些特点，需要在进

行设计时予以考虑。

(1)专用性。每一种机电一体化产品都有其自身特定的功能,对人机接口有着不同的要求,所以人机接口的设计方案要根据产品的要求而定。例如对于一些简单的二值性的控制参数,可以考虑采用控制开关;对于一些少量的数值型参数的输入可以考虑使用BCD码拨盘;而当系统要求输入的控制命令和参数比较多时,则应考虑使用行列式键盘等等。

(2)低速性。与控制微机的工作速度相比,大多数人机接口设备的工作速度是很低的,所以在进行人机接口设计时,要考虑控制微机与接口设备间的速度匹配,提高控制微机的工作效率。

(3)高性能价格比。由于机电的结合,大大强化了机械系统功能,使整个机电系统具有高性能价格比。所以在进行人机接口设计时,在满足功能要求前提下,输入、输出设备配置以小型、微型、廉价型为原则。

3.2.2 输入接口设计

3.2.2.1 开关输入接口设计

对于一些二值化的控制命令和参数,可以采用简单的开关作为输入设备,常用的开关有按钮、转换开关等,其表示符号与接口示例如图3—2所示。

控制微机通过I/O口或扩展I/O口对A点电位进行检测,从而判断开关的状态。

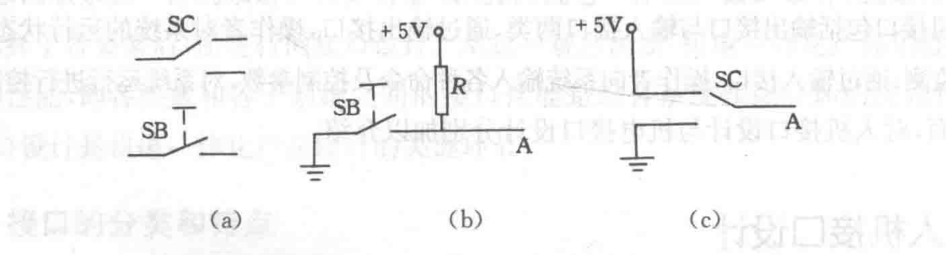


图3—2 开关的表示符号与接口电路

由于这类开关都是机械开关,机械触点的弹性作用使开关在闭合及断开瞬间产生抖动,造成A点电位产生一系列脉冲,如图3—3所示。抖动时间长短,与机械特性有关,一般为5~10ms。按钮的稳定闭合期由操作员的按键动作决定,一般在几百微秒至几秒之间。所以在进行实际接口设计时,必须采取软件或硬件措施进行消抖处理。

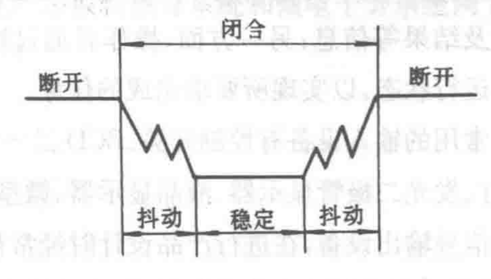


图3—3 开关接通与断开时的电压抖动

软件消抖办法是在检测到开关状态后，延时一段时间再进行检测，若两次检测到的开关状态相同则认为有效。延时时间应大于抖动时间。

硬件消抖常采用图3—4所示电路。

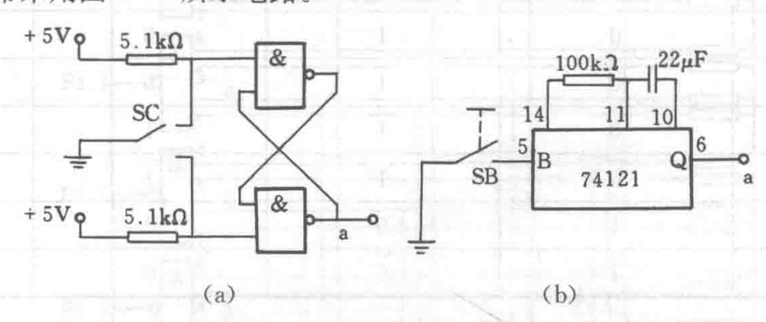


图3—4　消抖开关电路

3.2.2.2　拨盘输入接口设计

拨盘是机电一体化系统中常用的一种输入设备，若系统需要输入少量的参数，如修正系数、控制目标值等，采用拨盘较为可靠方便。这种输入方式具有保持性。

1. BCD码拨盘的结构

拨盘种类很多，人机接口使用最方便的是十进制输入、BCD码输出的BCD码拨盘，其结构如图3—5所示。

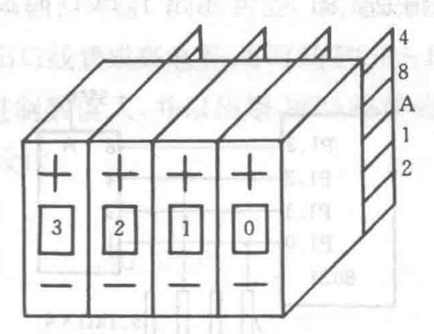


图3—5　BCD码拨盘的结构示意图

拨盘内部有一个可转动圆盘，具有"0～9"十个位置，可以通过前面两个"+、—"按钮进行位置选择，对应每个位置，前面窗口有数字提示，拨盘后面有五根引出线，分别定义为A、1、2、4、8。当拨盘在不同位置时，1、2、4、8线与A线的通断关系如表3—1所示。

表3—1　BCD码拨盘通断状态表

位置 线号	8	4	2	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1

续表

位置 线号	8	4	2	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1

注:0——表示与A线不通;1——表示与A线通。

从表中可以看出,若将A线作为控制线,将8、4、2、1线作为数据线,当A线接高电平时,数据线输出的即是与拨盘位置相对应的BCD码。一片拨盘可以输入一位十进制数,当需要输入多位十进制数时,可以选用多片拨盘拼接,并通过相应的接口设计给每片拨码盘赋以相应的十进制权值。

2. BCD码拨盘的接口设计方法

(1)静态接口方法。由上述可知,BCD码拨盘可以直接与控制微机的并行口或扩展并行口相连,以BCD码形式输入信息。图3－6示出了BCD码拨盘与8031的P1口的接口电路。

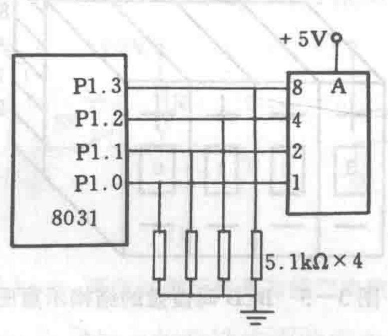


图3－6　单片BCD码拨盘与8031的接口电路

从图3－6中可以看出,每一片拨盘占用4根I/O口线,8031可以通过P1口直接读取拨盘数据。

(2)动态接口方法。当系统需要输入N位十进制数时,可以选N片拨盘拼接,但如按上图接法,需要占用4×N根I/O口线。为节省I/O口线,可以采用动态接口方法,图3－7示出了8031通过P1口扩展4片BCD码拨盘的接口电路。

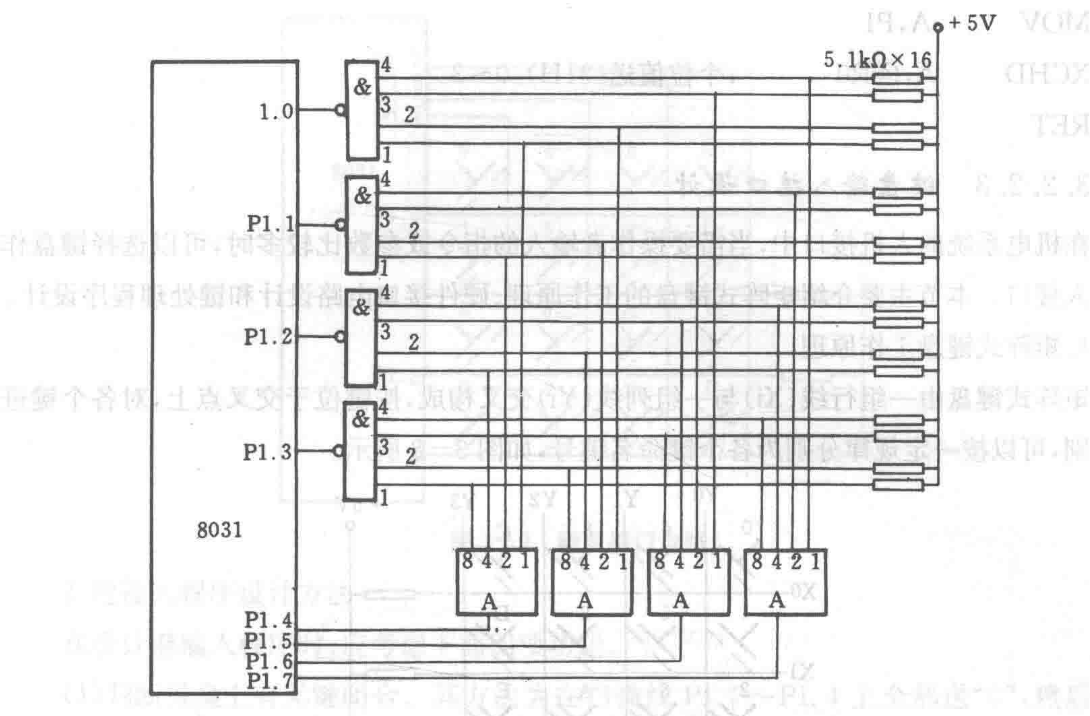


图 3—7 4 片 BCD 码拨盘与 8031 动态接口电路

当进行读码盘操作时，先将 P1.7 置成低电平，而将 P1.4、P1.5、P1.6 置成高电平，此时从 P1.0～P1.3 读取的即为第四位码盘(千位)的值。同理，分别将 P1.6、P1.5、P1.4 中的一位置成低电平，而将其他输出口线置成高电平，即可从 P1.0～P1.3 读取百位、十位和个位的输入值。若希望将 4 位十进制数读入，并以压缩 BCD 码格式存入 8031 内部 RAM 30H、31H 中，则相应程序可如下设计。

```
MOV     R0,#30H
MOV     P1,#7FH       ;P1.7=0
MOV     A,P1
SWAP    A
MOV     @R0,A         ;千位值送(30H).4～7
MOV     P1,#0BFH      ;P1.6=0
MOV     A,P1
XCHD    A,@R0         ;百位值送(30H).0～3
INC     R0
MOV     P1,#0DFH      ;P1.5=0
MOV     A,P1
SWAP    A
MOV     @R0,A         ;十位值送(31H).4～7
MOV     P1,#0EFH      ;P1.4=0
```

```
MOV    A,P1
XCHD   A,@R0        ;个位值送(31H).0~3
RET
```

3.2.2.3 键盘输入接口设计

在机电系统的人机接口中，当需要操作者输入的指令或参数比较多时，可以选择键盘作为输入接口。本节主要介绍矩阵式键盘的工作原理、硬件接口电路设计和键处理程序设计。

1. 矩阵式键盘工作原理

矩阵式键盘由一组行线(Xi)与一组列线(Yi)交叉构成，按键位于交叉点上，对各个键进行区别，可以按一定规律分别为各个键命名键号，如图 3－8 所示。

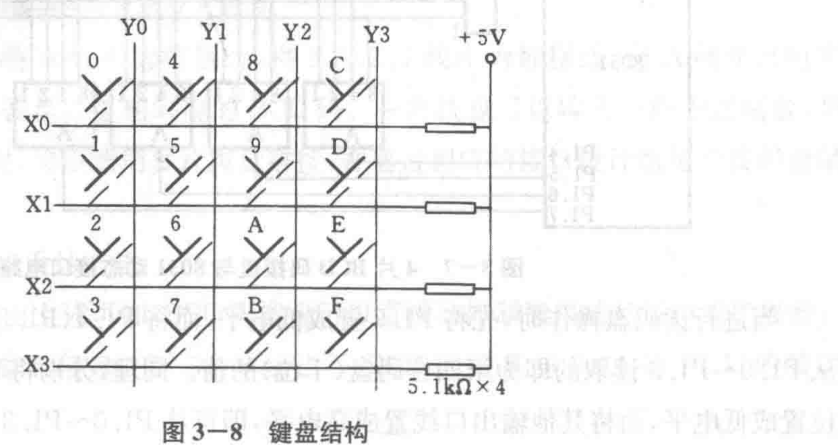


图 3－8 键盘结构

通常将行线通过上拉电阻接至＋5V 电源。当无键按下时，行线与列线断开，行线呈高电平。当键盘上某键按下时，则该键对应的行线与列线被短路。例如，7 号键被按下闭合时，行线 X3 与列线 Y1 被短路，此时 X3 的电平由 Y1 电位决定。如果将行线接至控制微机的输入口，列线接至控制微机的输出口，则在微机控制下依次从 Y0～Y3 输出低电平，并使其他线保持高电平，则通过对 X0～X3 的读取即可判断有无键闭合、哪一个键闭合。这种工作方式称为扫描工作方式，控制微机对键盘的扫描可以采取程控方式、定时方式，也可以采取中断方式。应该着重强调一点：由于按键为机械触点，故在闭合与释放瞬间，将产生抖动(如图 3－3 所示)，为保证对键的一次闭合做一次且仅做一次处理，必须采取去抖动措施，通常采用软件方法。

2. 键盘接口方法

图 3－9 示出了 8031 通过 P1 口与一个 4×4 键盘的接口电路，其中 P1.7～P1.4 作扫描输出线，P1.3～P1.0 作输入线。

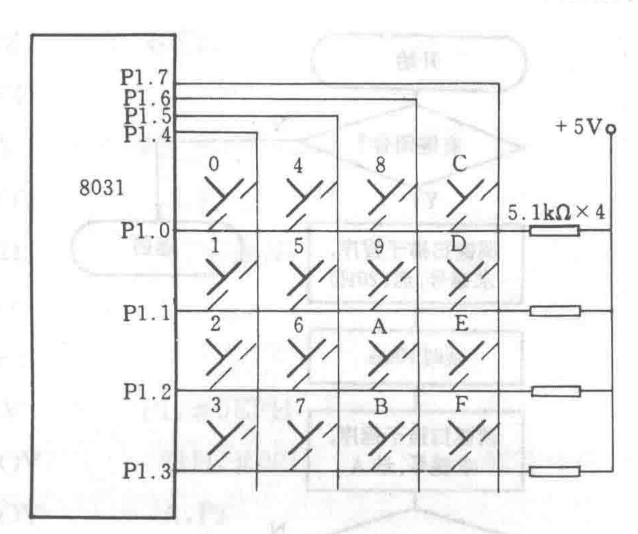


图 3—9 键盘接口电路

3.键输入程序设计方法

在设计键输入程序时，应考虑下面四项功能。

(1)判断键盘上有无键闭合。其方法为在扫描线 P1.7～P1.4 上全部送“0”，然后读取 P1.3～P1.0 状态，若全部为“1”，则无键闭合；若不全为“1”，则有键闭合。

(2)判别闭合键的键号。其方法为对键盘列线进行扫描，依次从 P1.7、P1.6、P1.5、P1.4 送出低电平，并从其他列线送出高电平，相应地顺序读入 P1.3～P1.0 的状态，若 P1.3～P1.0 全为“1”，则列线输出为“0”的这一列上没有键闭合；若 P1.3～P1.0 不全为“1”，则说明有键闭合。状态为低电平的键的行号加上其所在列的列首号即为该键键号，例如 P1.7～P1.4 输出为 1101，读回 P1.3～P1.0 为 1011，则说明位于第 2 行与第 1 列相交处的键处于闭合状态，第 1 列列首号为 4，行号为 2，则键号为 6。

(3)去除键的机械抖动。其方法是读得键号后延时 10ms，再次读键盘，若此键仍闭合则认为有效，否则认为前述键的闭合是由于机械抖动或干扰所引起的。

(4)使控制微机对键的一次闭合仅作一次处理。采用的方法是等待闭合键释放后再做处理。

根据以上四项功能要求，可如图 3－10 所示设计键盘输入程序框图，并按该框图编制相应的键盘输入程序。

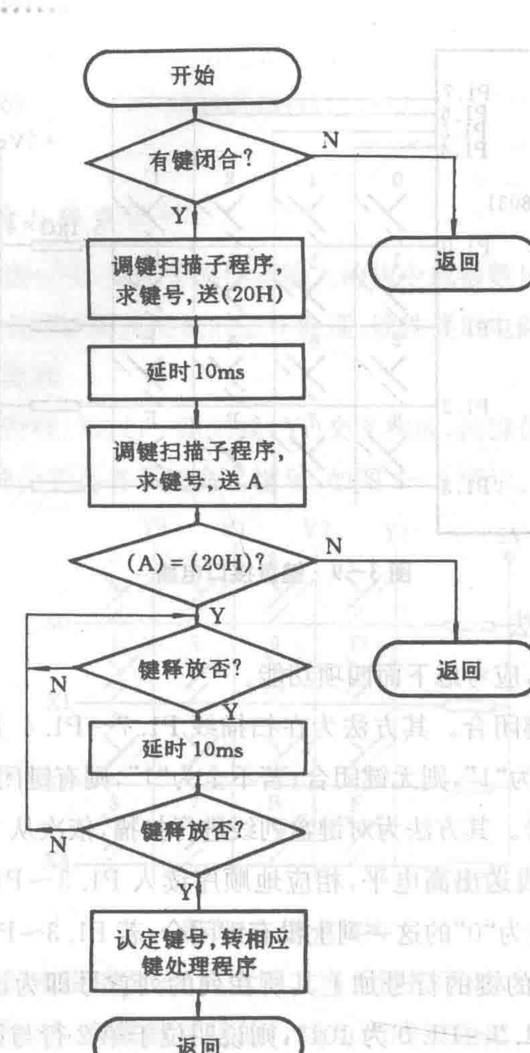


图3—10　键输入程序框图

```
        ACALL   KS1;判是否有键闭合
        JNZ     KEY1
KEY0:   RET
KEY1:   ACALL   KS2                 ;调求键值子程序
        MOV     20H,A
        ACALL   DL10;调延时子程序
        ACALL   KS2
        CJNE    A,20H,KEY0
KEY2:   ACALL   KS1                 ;判键释放否
        JNZ     KEY2
        ACALL   DL10
        ACALL   KS1
```

```
        JNZ    KEY2
        RET
KS1:    MOV    P1,#00H
        MOV    A,P1
        ORL    A,#0F0H
        CPL    A
        RET
KS2:    MOV    P1,#0EFH          ;P1.4=0
        MOV    21H,#00H          ;列首号存21H中
        MOV    A,P1
        ORL    A,#0F0H
        CPL    A
        JNZ    KS20;零列有键闭合
        MOV    P1,#0DFH          ;P1.5=0
        MOV    21H,#04H
        MOV    A,P1
        ORL    A,#0F0H
        CPL    A
        JNZ    KS20;一列有键闭合
        MOV    P1,#0BFH;P1.6=0
        MOV    21H,#08H
        MOV    A,P1
        ORL    A,#0F0H
        CPL    A
        JNZ    KS20;二列有键闭合
        MOV    P1,#7FH           ;P1.7=0
        MOV    21H,#0CH
        MOV    A,P1
        ORL    A,#0F0H
        CPL    A
        JNZ    KS20;三列有键闭合
        MOV    A,#0FFH           ;错误处理
        RET
```

```
KS20:   ADD     A,#03H          ;加偏移量
        MOVC    A,@A+PC         ;查表求列序号
        ADD     A,21H           ;求键号存A中
        RET
  DB    00H,01H,02H,02H,03H
  DB    03H,03H,03H
```

以上介绍的为程控工作方式,即对键盘的扫描由程序控制进行。实际在机电系统的工作过程中,操作者很少对系统进行干预,所以在大多数情况下,控制微机对键盘进行空扫描。为提高控制微机工作效率,也可以采取中断方式设计键盘接口,平时不对键盘进行监控,只有当有键闭合时,产生中断请求,控制系统才响应中断,对键盘进行管理。图3－11示出了中断方式的键盘硬件接口电路,其软件处理方法与采用程控方式时相似。

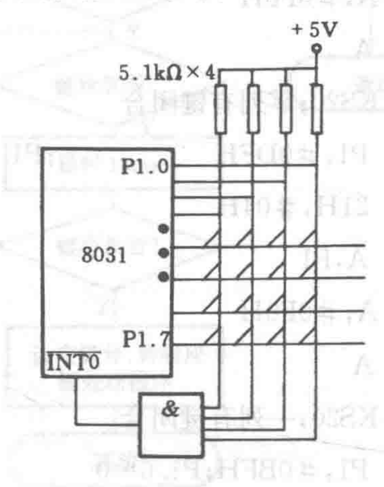


图3－11　中断方式键盘接口

3.2.3 输出接口设计

输出接口是操作者对机电系统进行监测的窗口,通过输出接口,机电系统向操作者显示自身的运行状态、关键参数及运行结果等,并进行故障报警。

3.2.3.1 *发光二极管显示器的接口设计*

1. 七段发光二极管显示器的基本结构

(1)发光二极管。发光二极管是由透明半导体材料制造的在一定条件下产生自发辐射荧光的一个PN结,它具有体积小、可靠性高、寿命长等优点,可以在低压、小电流下工作,而且损耗功率小,常用的发光二极管的工作电压为1.5～2.5V,电流为5～15mA。

由于以上特点,发光二极管在机电系统中常用作状态指示灯,图3－12示出了一种接口电路。

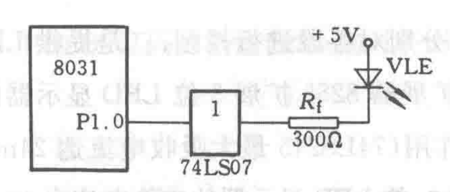


图3—12 单个发光二极管接口

图中，74LS07是一个OC门(集电极开路输出)同相驱动器，用来驱动发光二极管VLE。当P1.0为低电平时，74LS07输出也为低电平，VLE两端产生压降而发光；当P1.0为高电平时，74LS07开路，VLE中没有电流流过，不发光。VLE发光强度取决于流过的电流I_f，一般按10mA设计。R_f为限流电阻，I_f与R_f关系可由下式给出。

$$I_f=\frac{V_{cc}-V_f-V_{cs}}{R_f} \tag{3-1}$$

式中，V_{cc}为电源电压；V_f为VLE正向压降；V_{cs}为驱动器压降。

若取$V_f=2V$，$V_{cs}=0.3V$，为使I_f为10mA，R_f值应取270Ω，一般取300Ω。

(2)七段发光二极管显示器的基本结构。将发光二极管组成阵列，封装于标准外壳中，可构成各种发光二极管显示器(以下简称LED显示器)。机电系统的人机接口中，以七段LED显示器最为常用。为适应不同驱动电路，引线有共阳极与共阴极两种结构，如图3—13所示。用七段LED显示器可以显示0～9等十个数字和少数字母。另外显示器中还有一个小数点显示段，所以共计八段，分别用a～g及Dp表示。

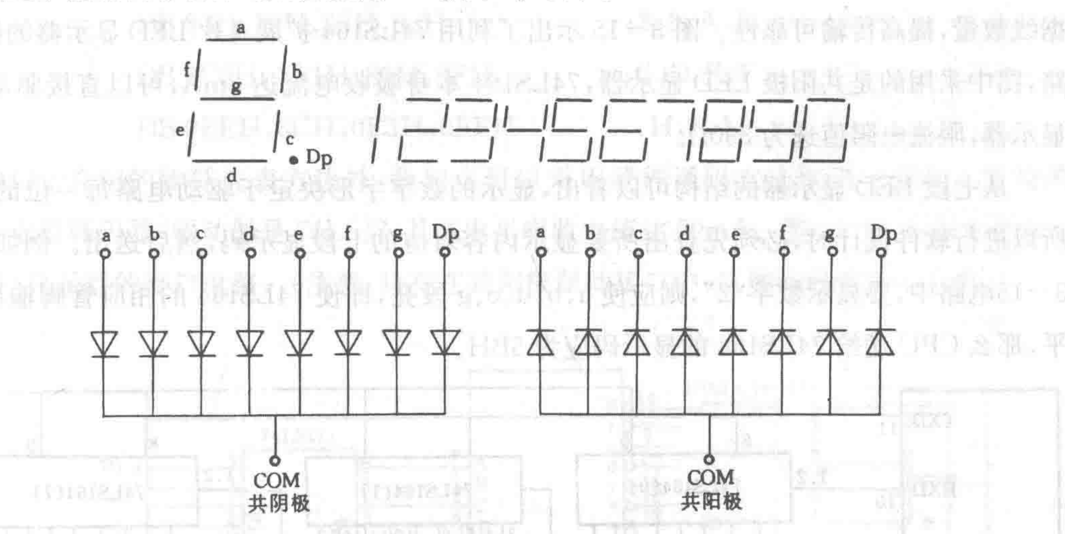


图3—13 七段LED显示器的结构

常用的1in以下的七段LED显示器一般每字段1个发光二极管，1in的每字段用2个发光二极管串联，尺寸越大，每段发光二极管越多，所需驱动电压也越高。

2.七段LED显示器接口电路设计

(1)静态工作方式的接口电路设计。七段LED显示器的接口电路设计有两个任务：一是提供正确的驱动逻辑，例如要显示“0”，就要使a、b、c、d、e、f段导通，而g与Dp段不导通，

这就需要用一个8位输出口分别对各段进行控制；二是提供LED显示器的工作电流。图3－14示出了用一片并行口扩展器8255扩展3位LED显示器的接口电路，图中的八总线收/发器74LS245起驱动器作用（74LS245最大吸收电流达24mA），用以提供LED显示器需要的电流，限流电阻选300Ω，使LED显示器的工作电流为10mA。

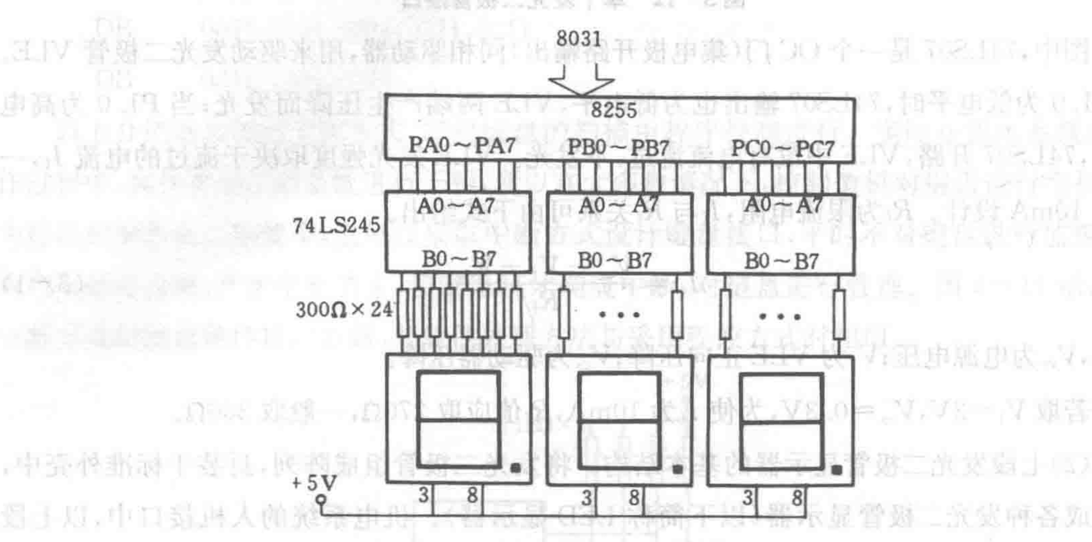


图3－14　三位静态LED显示器接口

除利用并行口扩展LED显示器外，也可以利用控制微机的串行口，通过串入并出的移位寄存器74LS164设计LED显示器接口，尤其当需要远程显示时，采用串行传输会减少数据线数量，提高传输可靠性。图3－15示出了利用74LS164扩展8片LED显示器的接口电路，图中采用的是共阳极LED显示器，74LS164本身吸收电流达8mA，可以直接驱动LED显示器，限流电阻值选为390Ω。

从七段LED显示器的结构可以看出，显示的数字字形决定于驱动电路每一位的状态，所以进行软件设计时，必须先查出所要显示内容对应的七段显示码，然后送出。例如，在图3－15电路中，要显示数字“2”，则应使a、b、d、e、g段亮，即使74LS164的相应管脚输出低电平，那么CPU送给74LS164的显示码应为5BH。

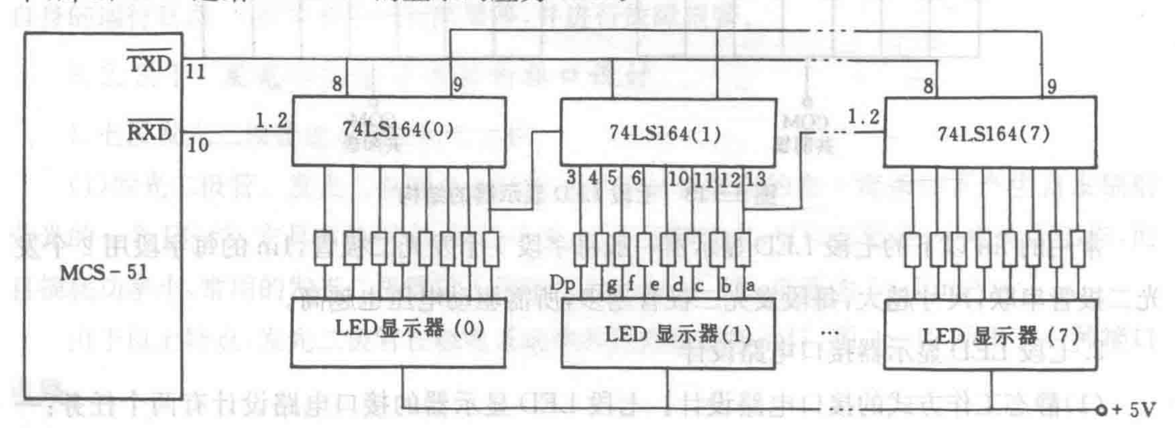


图3－15　利用串行口扩展静态LED显示器的接口电路

如欲将内存 30H～37H 中的 BCD 码数据送显示，则对应图 3－15 接口电路的更新显示子程序可设计如下。

```
        ORG     1FA0H
XS:     MOV     R7,#08H
        MOV     R0,#30H
XS1:    MOV     A,@R0               ;取要显示数
        MOV     DPTR,#2000H         ;置段码表首址
        MOVC    A,@A+DPTR           ;查取显示码
        MOV     SBUF,A              ;送显示
XS2:    JNB     T1,XS2              ;串行发送完?
        CLR     T1;清中断标志
        INC     R0;取下一个数
        DJNZ    R7,XS1
        RET
        ORG     2000H
TAB:    DB 0C0H,0F9H,0A4H,0B0H      ;0,1,2,3
        DB 99H,92H,82H,0F8H         ;4,5,6,7
        DB 80H,90H,88H,83H          ;8,9,A,B
        DB 0C6H,0A1H,86H,8FH        ;C,D,E,F
        DB 0BEH,8CH,0E3H,0FFH       ;H,P,U
```

除以上介绍的软件查表方法外，我们也可以采用硬件译码方法取得七段码。常用的 BCD－七段译码器/驱动器是 74LS47，其低电平吸收电流达 20mA。图 3－16 示出了 2 位七段 LED 显示器的接口电路。（注意：只有在共阳极驱动接口中，这种译码关系才正确。）

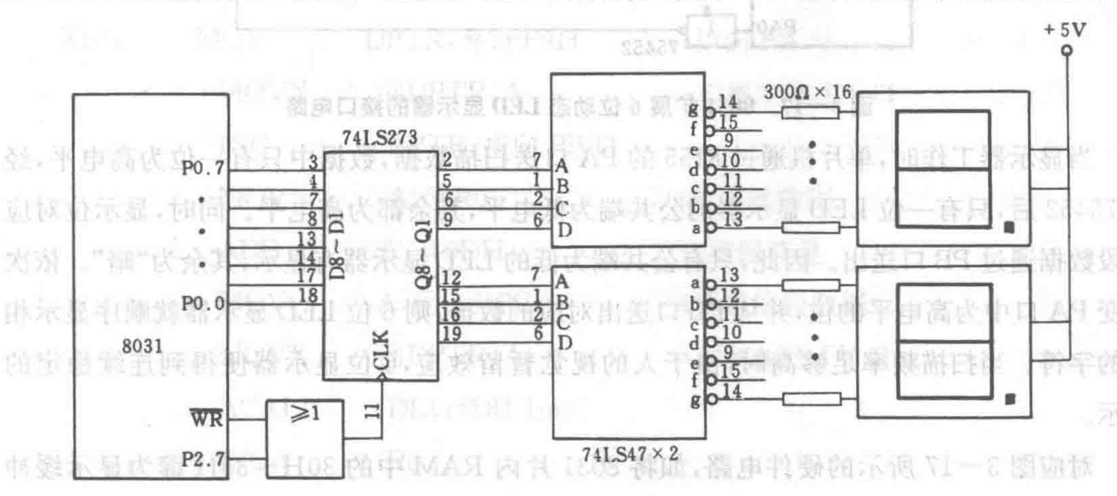


图 3－16 采用硬件译码的 LED 显示器接口电路

对应于这一电路，编程时可以直接把要显示数字送输出口，例如要将 8031 片内 RAM 30H 中的压缩 BCD 码送显示，则可执行如下程序。

```
MOV   A,30H
MOV   DPTR,#7FFFH
MOVX@DPTR,A
RET
```

静态工作方式的优点是显示稳定，只有在需要更新显示内容时，微机才执行显示更新子程序，因而大大节省了微机时间，提高了工作效率。其缺点是当扩展显示器位数较多时，需要占用较多 I/O 口。为了节省 I/O 口线，可以采用另一种显示方式——动态显示方式。

(2)动态工作方式的接口电路设计。图 3－17 示出了单片机通过一片 8155 扩展 6 位 LED 显示器的接口电路。电路中采用的是共阴极显示器，将 6 位 LED 显示器的数据端同名相连，然后分别接 8155 的 PB0～PB7，各位显示器的公共端由 PA0～PA5 控制，图中 7407 是 OC 门同相驱动器，其最大吸收电流为 40mA，75452 是 OC 门反相驱动器，其最大吸收电流为 300mA。

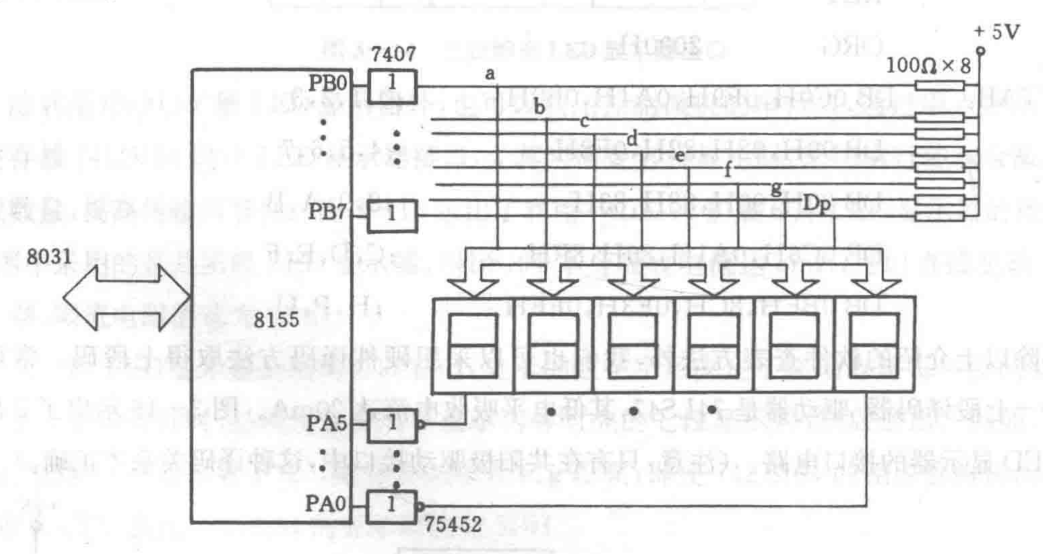


图 3－17　8031 扩展 6 位动态 LED 显示器的接口电路

当显示器工作时，单片机通过 8155 的 PA 口送扫描数据，数据中只有一位为高电平，经过 75452 后，只有一位 LED 显示器的公共端为低电平，其余都为高电平。同时，显示位对应的段数据通过 PB 口送出。因此，只有公共端为低的 LED 显示器有显示，其余为“暗”。依次改变 PA 口中为高电平的位，并从 PB 口送出对应的数据，则 6 位 LED 显示器就顺序显示相应的字符。当扫描频率足够高时，由于人的视觉暂留效应，6 位显示器便得到连续稳定的显示。

对应图 3－17 所示的硬件电路，如将 8031 片内 RAM 中的 30H～35H 辟为显示缓冲区，可设计出相应的显示子程序框图，如图 3－18 所示，对应的显示子程序清单如下。

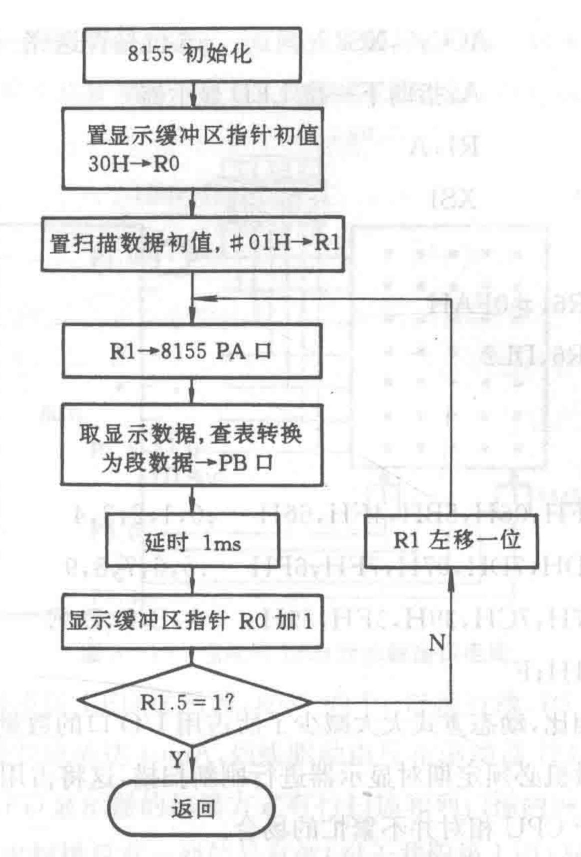


图 3—18 显示子程序框图

```
XS:   MOV    DPTR,#7FF8H     ;8155 命令寄存器地址送 DPTR
      MOV    A,#03H          ;8155 初始化
      MOVX   @DPTR,A         ;PA,PB 为输出口
      MOV    R0,#30H         ;设置显示缓冲
      MOV    R1,#01H         ;区首址
      MOV    A,R1
XS1:  MOV    DPTR,#7FF9H     ;指向 PA 口
      MOVX   @DPTR,A         ;扫描字送 PA 口
      INC    DPTR;指向 PB 口
      MOV    A,@R0           ;取显示数据
      ADD    A,#0DH          ;加偏移量
      MOVC   A,@A+PC         ;查表取段数据
      MOVX   @DPTR,A         ;段数据送 PB 口
      ACALL  DL1;延时 1ms
      INC    R0
      MOV    A,R1
```

```
        JB      ACC,5,XS2       ;6位是否送完
        RL      A;指向下一位LED显示器
        MOV     R1,A
        SJMP    XS1
XS2:    RET
DL1:    MOV R6,#0FAH
DL2:    DJNZ R6,DL2
        RET
;共阴极段数据表
        DB 3FH,06H,5BH,4FH,66H   ;0,1,2,3,4
        DB 6DH,7DH,07H,7FH,6FH   ;5,6,7,8,9
        DB 77H,7CH,39H,5FH,79H   ;A,B,C,D,E
        DB 71H;F
```

与静态工作方式相比，动态方式大大减少了所占用I/O口的数量，节省了硬件费用。但是，为得到稳定显示，微机必须定期对显示器进行刷新扫描，这将占用CPU大量时间。故动态显示方式主要适用于CPU相对并不繁忙的场合。

Intel公司推出的一种专用键盘/显示器接口器件8279很好地解决了这一矛盾。它可以直接和MCS—51、MCS—96等单片机总线连接，能自动对8×8的键盘进行扫描，接收键盘上的输入信息，并存入内部的FIFO(先入先出)缓冲器，在有键输入时向CPU请求中断。同时，8279内部有一个16×8的显示缓冲器。当CPU对8279写入要显示内容后，能自动对8位或16位LED显示器进行扫描，无须CPU干预，因而简化了系统软件设计，提高了CPU的工作效率。8279有多种工作方式，主控微机可通过对8279写入命令字来选择。关于8279的结构、工作原理及应用本书不做详细介绍，应用时请读者参考有关资料。

3. 点阵式LED显示器及接口设计

七段LED显示器可以显示数字及一些简单符号、字母，当显示信息比较复杂时，可以选用点阵式LED显示器做输出设备。

(1)点阵式LED显示器结构。点阵式LED显示器由发光二极管矩阵组成，常用的有7行5列和8行8列两种。单个点阵LED显示器能够显示各种字母、数字和常用的符号，用多个点阵式LED显示器可以显示图形、汉字以及表格等，因此在大屏幕显示牌及智能化仪器中有着广泛应用。

点阵式LED显示器在行线与列线的每个交点上都装有一个发光二极管，正极接行引线，负极接列引线的称为共阳极LED点阵显示器；正极接列引线，负极接行引线的称为共阴极LED点阵显示器。

(2)点阵式LED显示器的接口设计。点阵式LED显示器一般采用动态扫描方式显示。图3-19示出了8031单片机扩展一片5×7点阵式LED显示器的接口电路。

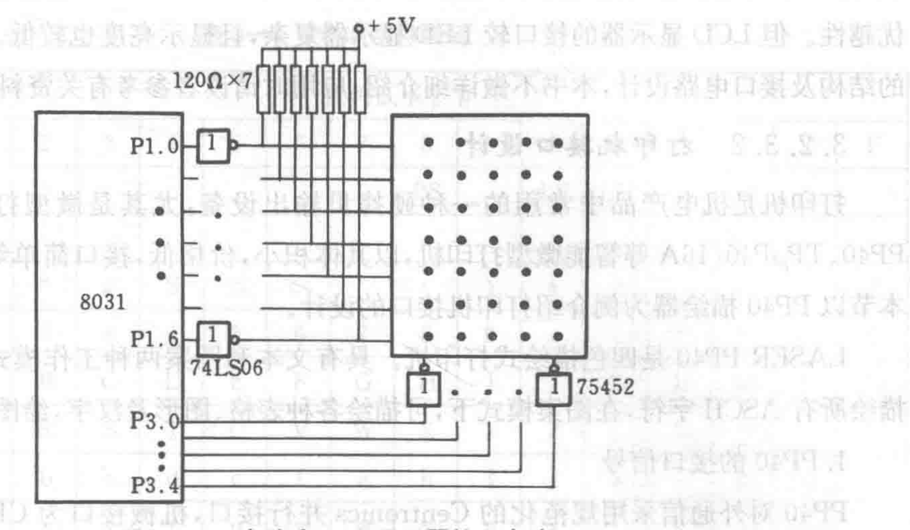


图3-19 点阵式LED显示器接口电路

图中采用了共阳极点阵LED显示器,8031的P1口接行线,P3口接列线,行线驱动由74LS06完成,其最大吸收电流达40mA,列线驱动由反相驱动器75452完成,其最大吸收电流达300mA,点阵式LED显示器的扫描方式有行扫描和列扫描两种。列扫描时由列线控制口输出列选通信号,每次扫描只有一列信号有效(对于共阳极LED显示器,低电平为有效列信号),然后由行线控制口输出被选中列的显示信息。依次改变被选中列,就可以完成对整个显示器的驱动。类似地,行扫描时由行线控制口输出行选通信号,每次只有一行被选中(对于共阳极LED显示器,高电平为有效行选通信号),然后由列线控制口输出相应列显示信息。在列扫描方式中,每显示一个字符或数字,需要5组行显示数据,所以显示程序中的显示字库每个字符要占5个字节的存储单元。表3-2列出了采用共阳极LED显示器时,显示字母"C"的列扫描点阵数据,每个字节对应一列发光二极管。显示时,在P3口同步下,按序号将一个个字节顺序地由P1口送出,数据为"0"的位所对应的发光二极管亮,数据为"1"的位所对应的发光二极管不亮。

表3-2 字母"C"的点阵数据

序号	数据							
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
1	1	1	0	0	0	0	0	1
2	1	0	1	1	1	1	1	0
3	1	0	1	1	1	1	1	0
4	1	0	1	1	1	1	1	0
5	1	1	0	1	1	1	0	1

在进行机电产品的显示输出接口设计时,除了LED显示器外,还可以选择液晶显示器

LCD。与 LED 显示器相比，LCD 显示器具有体积小、质量轻、功耗极低，显示内容丰富等优点，尤其在电池供电，要求器件功耗低的场合，例如钟表、仪器仪表及计算机中，更显示出其优越性。但 LCD 显示器的接口较 LED 显示器复杂，且显示亮度也较低。关于 LCD 显示器的结构及接口电路设计，本书不做详细介绍，应用时请读者参考有关资料。

3.2.3.2 打印机接口设计

打印机是机电产品中常用的一种硬拷贝输出设备，尤其是微型打印机，例如 GP16、PP40、TPμP40/16A 等智能微型打印机，以其体积小，价格低，接口简单等优点被广泛使用。本节以 PP40 描绘器为例介绍打印机接口的设计。

LASER PP40 是四色描绘式打印机。具有文本和图案两种工作模式，在文本模式下可描绘所有 ASCII 字符，在图案模式下，可描绘各种表格、图形及汉字，绘图功能较强。

1. PP40 的接口信号

PP40 对外通信采用规范化的 Centronics 并行接口，机械接口为 CHAPM36 球锁式插座，表 3－3 列出了 PP40 通信接口插座芯位信号及功能说明。

表 3－3 PP40 通信接口插座芯位信号及功能说明

芯位	信号	功能说明
1	$\overline{\text{STROBE}}$	选通输入信号，其上升沿将 D1～D8 上的信息打入 PP40
2～9	D1～D8	8 位并行数据
10	$\overline{\text{ACK}}$	应答信号，表示 PP40 准备接收下一批数据
11	BUSY	状态输出线。为高表示 PP40 正在工作中，不能接收新数据，当 PP40 空闲时输出低电平
其余	GND 或 NC	地或空脚

图 3－20 示出了 PP40 的接口信号时序。

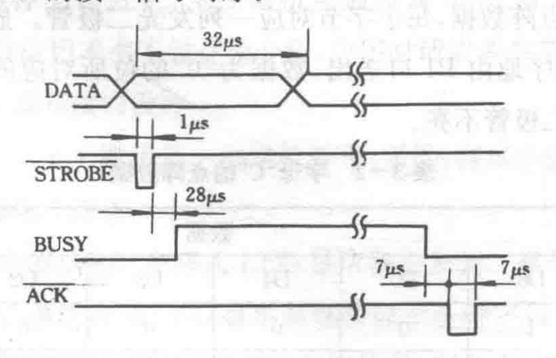


图 3－20 PP40 接口信号时序

2. PP40 的工作方式及控制命令

PP40 具有文本、图案两种工作方式，上电初始化为文本方式。

(1)文本方式。PP40 的文本方式用于描绘字符串，表 3－4 列出了常用可打印的字符编码，表 3－5 列出了文本方式下常用的命令。

(2)图案方式 PP40在图案方式下,提供多种绘图操作命令,供用户编制程序使用,以便绘制各种图形表格、曲线。绘图命令及功能列于表3—6。

表3—4 PP40字符编码

代码表		代码低半字节															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
代码高半字节	0									BS		LF	LU		CR		
	1														NC		
	2		!	“	#	$	%	&	’	(	)	*	+	,	—	。	/
	3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
	4	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	5	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[	\	]	^	—
	6	‘	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
	7	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{	|	}	~	

表3—5 文本方式下常用命令

命令	代码	说明
回位 BS	08H	使笔回前一个字符位置
进纸 LF	0AH	将纸推进一行
退纸 LU	0BH	将纸倒退一行
回车 CR	0DH	笔返回最左边并进纸一行
方式控制码1	11H	将0DH,11H写入PP40,则PP40置成文本方式
方式控制码2	12H	将0DH,12H写入PP40,则PP40置成图案方式
转色 NC	1DH	使笔架转动一个位置,描绘笔换一种颜色

表3—6 绘图命令表

命令	格式	功能
线形式	Lp(p=1～15)	p=0:实线;p=1～15:点线
重置	A	笔架返回X轴最左方,Y轴不动,返回文字模式,并以笔架停留点作为起点
预备	I	以笔架位置作为起点
回档	H	笔嘴升起返回起点
绘线	DX,Y,…,Xn,Yn	由现时笔嘴位置至(X,Y)连线
相对绘线	JΔX,ΔY,…,ΔXn,ΔYn	由现时笔嘴位置(X,Y)连线至(X+ΔX,Y+ΔY)
移动	MX,Y	笔嘴升起,移动至点(X,Y)
相对移动	RΔX,ΔY	笔嘴升起,移动至距当前点(ΔX,ΔY)之新点
颜色转换	Cn(n=0～3)	0:黑;1:蓝;2:绿;3:红

续表

命令	格式	功能
字符尺码	Sn(n=0～63)	指定字符尺码
字母编印方向	Qn(n=0～3)	指定文字编印方向(见图 3-21 定义)
编印	PC,C0,C1,…,Cn	编印字符(Cn 为字符,n 无限制)
绘轴	Xp,q,r(p=0,1)(q=-999～999)	由现时笔架位置绘制轴线,p=0:Y 轴;p=1:X 轴;q 为点距;r 为重复次数(r=1～125)

图 3-21 示出了 X、Y 方向定义,字符描绘方向定义及 X 指令示例。X 指令示例:当执行指令"X1,100,5"(将 58H,31H,2CH,31H,30H,30H,2CH,35H,0DH 依次写入 PP40)后,PP40 描绘出图形如图 3-21(c)所示。

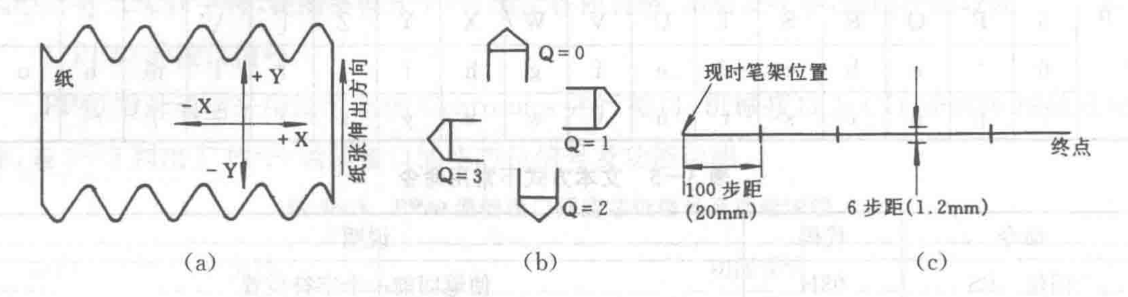


图 3-21 绘图命令的几个定义与实例

PP40 的绘图命令可以分为不带参数的单字符指令、只带一个参数的指令、带两个参数的指令、编印字符指令(P 指令)和绘制轴线指令(X 指令)等五类。绘图命令的编排有如下约定。

(1)单字符命令后可直接跟其他指令(返回文本命令除外,它后面必须跟回车符 0DH)。例如:

HJ300,-100 [CR]等价于

H [CR]

J300,-100 [CR]

(2)对于一个参数的命令,可以在参数后加","后跟其他命令。例如:

L2,C3,Q3,S0,M-150,-200 [CR]

(3)二个参数以上的指令必须以回车符 CR 结束,不可省略。

3. PP40 的硬件接口电路设计

图 3-22 示出了 8031 单片机通过扩展输出口 74LS273 与 PP40 接口方法。PP40 的 $\overline{STB}$ 与 8031 的 $\overline{WR}$ 相连,由于 PP40 的 $\overline{STB}$ 负脉冲宽度要求在 1μs 以上,故采用单稳多谐振荡器 74LS123 将 $\overline{WR}$ 信号负脉冲展宽。PP40 的状态信号 BUSY 连 8031 的 P3.3,既可做中断请求输入线($\overline{INT1}$),又可供查询用(P3.3),当做中断请求输入时,8031 的 $\overline{INT1}$ 应设为边沿触发方式。

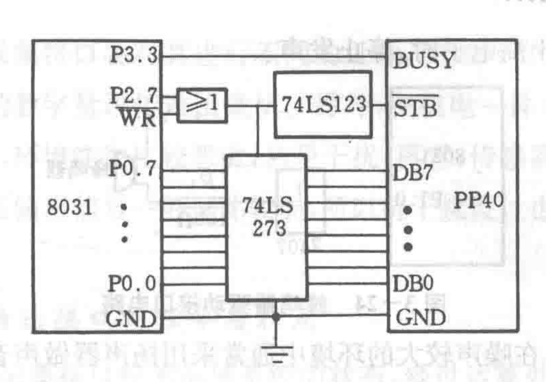


图 3－22 PP40 与 8031 的一种接口电路

3.2.3.3 CRT 显示器接口简介

当希望机电系统的输出接口有较强功能时可以选择 CRT(阴极射线管显示器)做输出设备,它可以实现复杂的文字、图形显示。但与前面介绍的几种输出设备相比,CRT 驱动接口设计相对复杂。为使普通用户避免花费大量时间进行 CRT 接口设计,能像使用打印机一样方便地使用 CRT,国内几家科研单位陆续研制了几种 CRT 显示接口板,用户可以直接选用。

一般的 CRT 接口板与控制微机间以并行口进行命令和数据传递,板内配有硬字库及用户可扩充字库。工作时,主控微机向接口板输入要显示字符的代码及在屏幕上的显示位置,由接口板完成屏幕编辑及视频信号合成,在 CRT 显示屏上呈现一幅固定的画面。只有当主控微机输入新的命令后,画面才会改变。图 3－23 示出了 8031 单片机通过 SCIB 显示接口板驱动 CRT 的接口电路。

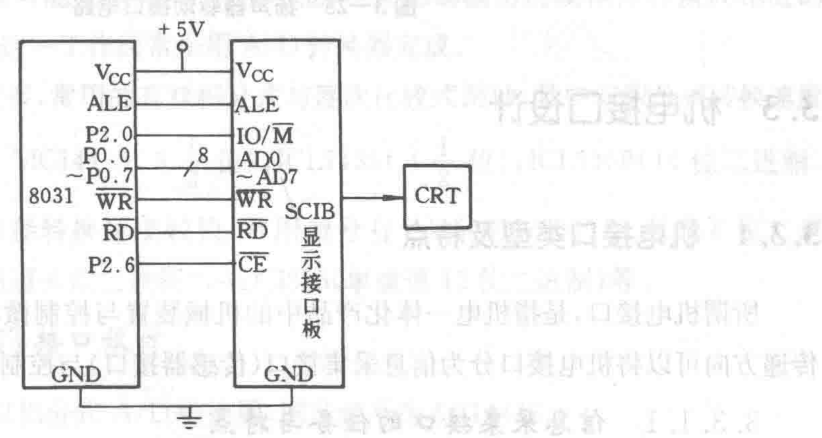


图 3－23 SCIB 显示接口板与 8031 的接口方法

3.2.3.4 扬声器接口设计

在机电系统的人机接口设计中,经常采用扬声器或蜂鸣器产生声音信号,以提示系统状态,如状态异常、工件加工结束等。

蜂鸣器为一个双引脚器件,只要在两极间加上适当直流电压,即可发声,故而与控制微机接口简单,软件设计也容易,如图 3－24 所示。图中 74LS07 为驱动器。当 P1.0 输出低电

平时,蜂鸣器即发声;输出高电平时,停止发声。

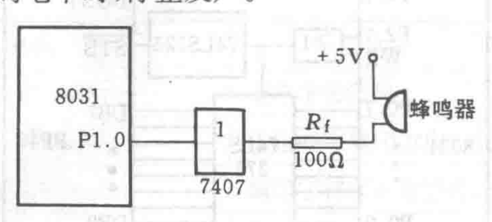


图 3－24 蜂鸣器驱动接口电路

但蜂鸣器音量较小,在噪声较大的环境中通常采用扬声器做声音输出,扬声器要求以音频信号驱动。图 3－25(a)示出了以集成电路产生音频信号,经放大后驱动扬声器的接口电路。在电路中,音频信号频率取决于 R 与 C 的值,发声否受微机控制,软件设计简单。但电路参数一经确定,扬声器的驱动频率也就固定了,所以只能以一种音调工作。图 3－25(b)示出了声调可以根据需要改变的扬声器驱动接口电路,音频信号由 8031 软件产生,音调丰富,但软件设计工作量大。

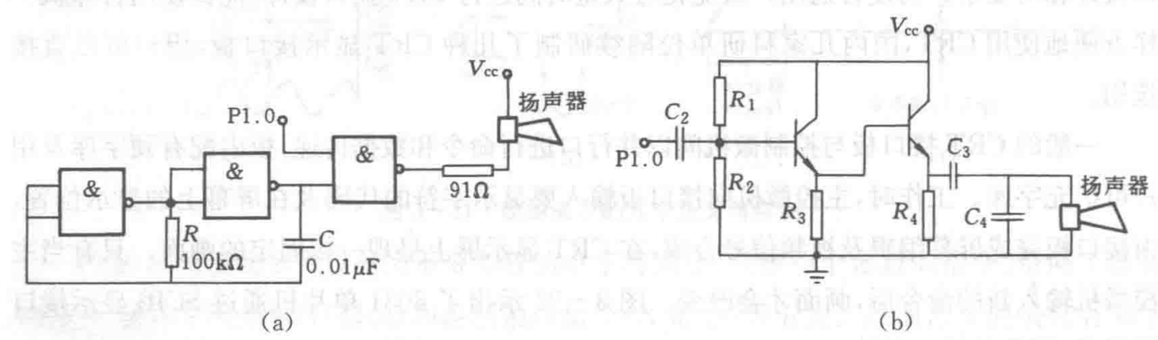


图 3－25 扬声器驱动接口电路

3.3 机电接口设计

3.3.1 机电接口类型及特点

所谓机电接口,是指机电一体化产品中的机械装置与控制微机间的接口。按照信息的传递方向可以将机电接口分为信息采集接口(传感器接口)与控制量输出接口。

3.3.1.1 信息采集接口的任务与特点

在一个机电一体化产品中,控制微机要对机械装置进行有效控制,使其按预定的规律运行,完成预定的任务,就必须随时对机械系统的运行状态进行监控,随时检测各种工作和运行参数,如位置、速度、转矩、压力、温度等等。因此进行系统设计时,必须选用相应传感器将这些物理量转换为电量,再经过信息采集接口的整形、放大、匹配、转换,变成微机可以接受的信号传递给微机。传感器的输出信号中,既有开关信号(如限位开关,时间继电器等),又有频率信号(超声波无损探伤);既有数字量,又有模拟量(如温敏电阻,应变片等等)。针对

不同性质的信号，信息采集接口要对其进行不同的处理，例如对模拟信号必须进行模/数转换，变成微机可以接受的数字量再传送给微机。另外，在机电一体化产品中，传感器要根据机械系统的结构来布置，环境往往比较恶劣，易受干扰；再者，传感器与控制微机之间常要采用长线传输，加之传感器输出信号一般又比较弱，所以抗干扰设计也是信息采集接口设计的一个重要内容。

3.3.1.2　控制输出接口的任务与特点

控制微机通过信息采集接口检测机械系统的状态，经过运算处理，发出有关控制信号，经过控制输出接口的匹配、转换、功率放大，驱动执行元件去调节机械系统的运行状态，使其按设计要求运行。根据执行元件的需要不同控制接口的任务也不同，例如对于交流电动机变频调速器，控制信号为 0～5V 电压或 4～20mA 电流信号，则控制输出接口必须进行数/模转换；对于交流接触器等大功率器件，必须进行功率驱动。由于机电系统中执行元件多为大功率设备，如电动机、电热器、电磁铁等，这些设备产生的电磁场、电源干扰往往会影响微机的正常工作，所以抗干扰设计同样是控制输出接口设计时应考虑的重要内容。

3.3.2　信号采集通道中的 A/D 转换接口设计

在机电一体化产品常用的传感器中，有很多是以模拟量形式输出信号的，如位置检测用的差动变压器、温度检测用的热电偶、温敏电阻、转速检测用的测速发电机等。但由于控制微机是一个数字系统(有些型号单片机内部集成了模/数转换器件，如 MCS－96 系列单片机等)。这就要求信息采集接口能完成 A/D 转换功能，将传感器输出的模拟量转换成相应的数字量，输入给控制微机，这一工作通常采用 A/D 转换器完成。

A/D 转换器的种类很多，常用的有双积分式与逐次比较式两种，其中双积分式转换速度慢，但精度高，常用型号有 MC14433($3\frac{1}{2}$ 位)，ICL7135($4\frac{1}{2}$ 位)，ICL7109(12 位二进制)等；逐次比较式 A/D 转换器转换速度较快，常用型号有 ADC0808/0809(8 通道 8 位二进制)，ADC0816/0817(16 通道 8 位二进制)，ADCl210(单通道 12 位二进制)等。

3.3.2.1　MC14433 接口设计

MC14433 是 $3\frac{1}{2}$ 位双积分式 A/D 转换器，国产型号为 5G14433。

1. 主要技术性能

转换精度：读数的±0.05%±1 字；

转换速率：4～10 次/s；

量　　程：199.9mV 或 1.999V(由基准电压 V_R 决定)；

基准电压：200mV 或 2V；

转换结果输出形式：分时输出 BCD 码。

2. 引脚说明

MC14433 是一个 24 脚，双列直插式芯片，图 3－26 示出了 MC14433 的引脚分布，各引脚功单如下。

V_{DD}：主电源，＋5V；

V_{EE}：模拟部分负电源，－5V；

V_{SS}：数字地；

V_R：基准电压输入引脚，取 200mV 或 2V；

V_X：被测电压输入引脚，最大为 199.9mV 或 1.999V；

V_{AC}：模拟地；

R_1，C_1，R_1/C_1：积分电阻、电容输入引脚，C_1 一般取 0.1μF 的聚丙烯电容，R_1 取 27kΩ(对应 199.9mV 量程)或 470kΩ(对应 1.999V 量程)；

C_{01}，C_{02}：接失调补偿电容 C_0，C_0 一般取 0.1μF；

CLK0，CLK1：振荡器频率调节电阻 R_C 输入引脚，典型值为 470kΩ，R_C 越大，工作频率越低；

EOC：转换结束状态输出线，当一次转换结束后，EOC 输出一个宽为 1/2 个时钟周期的正脉冲；

DU：更新转换控制信号输入线，高电平有效，若 DU 与 EOC 相连，则每次 A/D 转换结束后自动启动新的转换；

$\overline{OR}$：过量程状态信号输出线，低电平有效，当 $|V_X| > V_R$ 时，$\overline{OR}$ 输出低电平；

DS_4～DS_1：分别是个、十、百、千位的选通脉冲输出线；

Q_3～Q_0：BCD 码数据输出线，动态输出千位、百位、十位、个位值；DS_1 有效时，Q_3 表示千位值(0 或 1)，Q_2 表示极性(0 负 1 正)，Q_1 无意义，Q_0 为 1 而 Q_3 为 0 表示过量程，Q_0 为 1 且 Q_3 为 1 表示欠量程；当 DS_2 有效时，Q_3～Q_0 以 BCD 码输出百位值、十位值和个位值的输出形式与此相同。

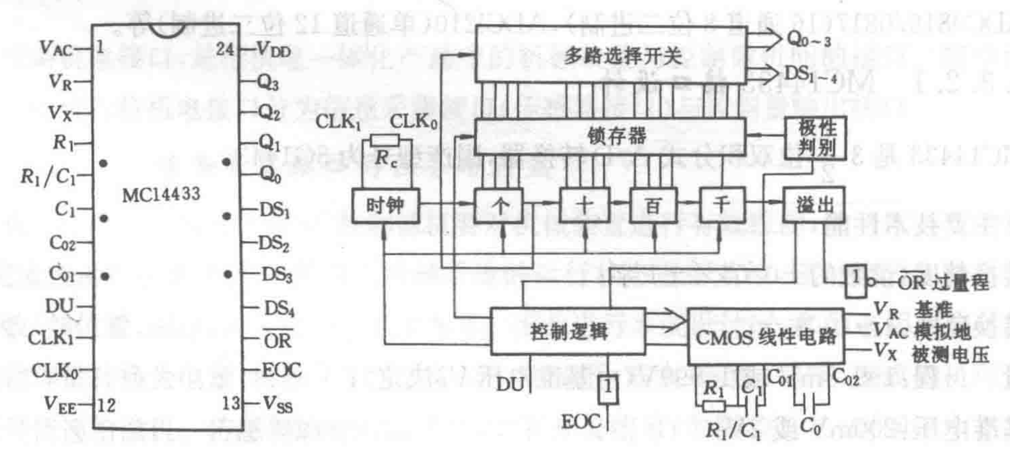


图 3－26　MC14433 引脚

图 3－27 示出了 MC14433 的转换结果输出时序波形。从图中可以看出，转换结果的千位值、百位值、十位值、个位值是在 $DS_1 \sim DS_4$ 的同步下分时由 $Q_3 \sim Q_0$ 送出的。

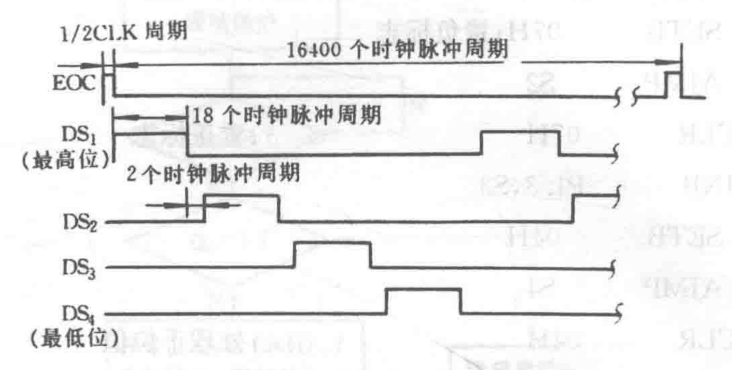


图 3－27 MC14433 转换结果输出时序波形

3. 接口设计举例

由于 MC14433 的转换结果是动态地轮流以 BCD 码输出，非总线形式，因此必须通过并行口与主控微机相连，图 3－28 示出了 8031 通过 P1 口扩展一片 MC14433 的电路原理图。

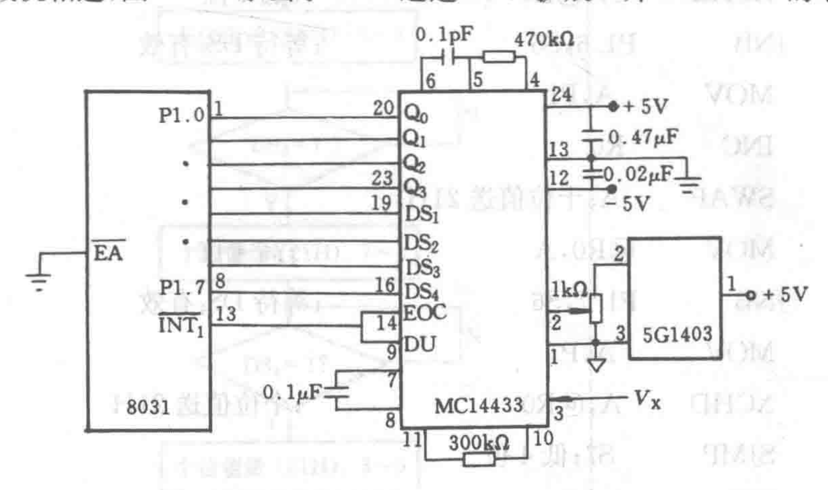


图 3－28 MC14433 与 8031 直接连接的接口方法

在图 3－28 中，5G1403 为精密参考电压源，向 MC14433 提供参考电压，8031 读取 A/D 转换结果可以采取查询方式或中断方式。如欲按图 3－29 所示格式存放 A/D 转换结果，则采用中断方式读取转换结果的中断服务子程序框图如图 3－30 所示。相应程序可设计如下。

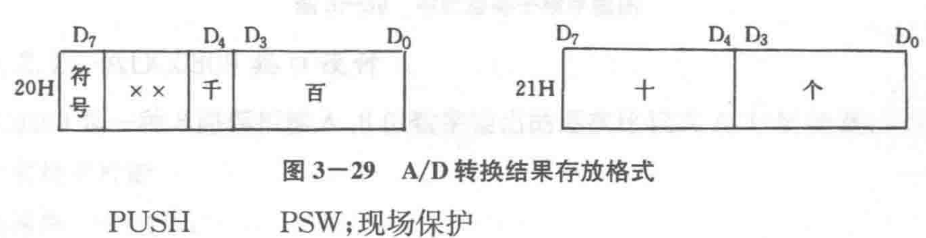


图 3－29 A/D 转换结果存放格式

```
      PUSH   PSW;现场保护
      PUSH   ACC
INT:  JNB    P1.4,INT             ;等待DS1有效
```

```
        JB      P1.0,OVER       ;超量程转 OVER
        JNB     P1.2,S1
        SETB    07H;置负标志
        AJMP    S2
S1:     CLR     07H             ;置正标志
S2:     JNB     P1.3,S3
        SETB    04H
        AJMP    S4
S3:     CLR     04H             ;处理千位值
S4:     JNB     P1.5,S4         ;等待 DS2 有效
        MOV     A,P1
        MOV     R0,#20H         ;百位值送 20H
        XCHD    A,@R0           ;低 4 位
S5:     JNB     P1.6,S5         ;等待 DS3 有效
        MOV     A,P1
        INC     R0
        SWAP    A;十位值送 21H
        MOV     @R0,A           ;高 4 位
S6:     JNB     P1.7,S6         ;等待 DS4 有效
        MOV     A,P1
        XCHD    A,@R0           ;个位值送 21H
        SJMP    S7;低 4 位
OVER:   SETB    06H
S7:     POP     ACC
        POP     PSW;恢复现场
        RETI
```

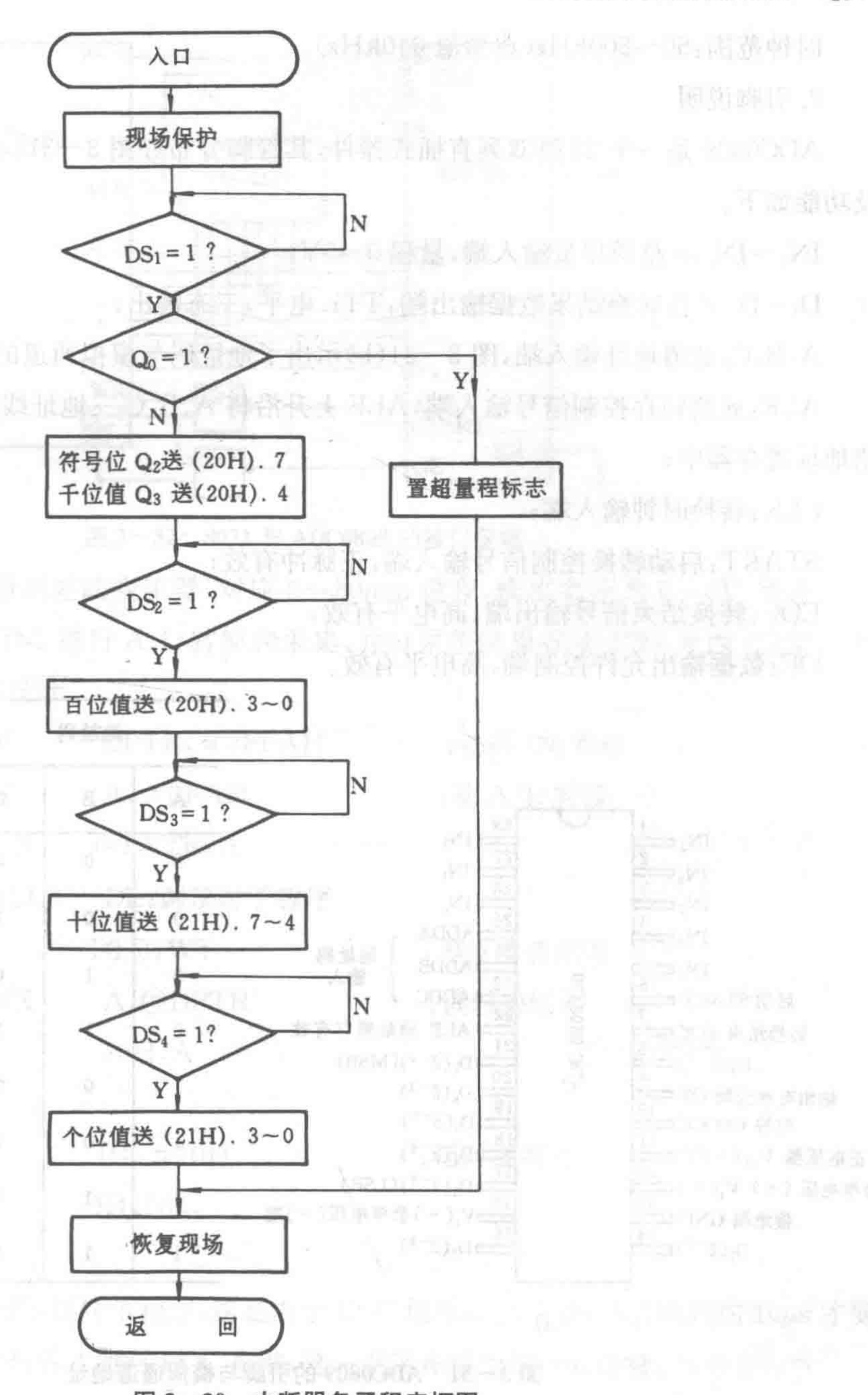


图 3－30 中断服务子程序框图

3.3.2.2 ADC0809 接口设计

ADC0809 是一种 8 路模拟输入、8 位数字输出的逐次比较式 A/D 转换器。

1. 主要技术性能

转换精度：±0.4%；

量　　程：0～5V；

转换速度：100μs/次（典型值）；

时钟范围：50～800kHz（典型值 640kHz）。

2. 引脚说明

ADC0809 是一个 28 脚双列直插式器件，其管脚分布如图 3－31(a)所示，主要管脚符号及功能如下。

IN_0～IN_7：8 路模拟量输入端，量程 0～5V；

D_0～D_7：8 位转换结果数据输出端，TTL 电平，三态输出；

A，B，C：通道地址输入端，图 3－31(b)示出了地址码与模拟通道的对应关系；

ALE：通路锁存控制信号输入端，ALE 上升沿将 A、B、C 三地址线的状态锁存到片内通路地址寄存器中；

CLK：转换时钟输入端；

START：启动转换控制信号输入端，正脉冲有效；

EOC：转换结束信号输出端，高电平有效；

OE：数据输出允许控制端，高电平有效。

(a)

地址码			选通模拟通道
A	B	C	
0	0	0	IN_0
0	0	1	IN_1
0	1	0	IN_2
0	1	1	IN_3
1	0	0	IN_4
1	0	1	IN_5
1	1	0	IN_6
1	1	1	IN_7

(b)

图 3－31　ADC0809 的引脚与模拟通道地址

3. 接口设计

由于 ADC0809 内部有三态输出的数据锁存器，故可与控制微机的总线直接接口。图 3－32示出了 8031 单片机与 ADC0809 的接口逻辑。

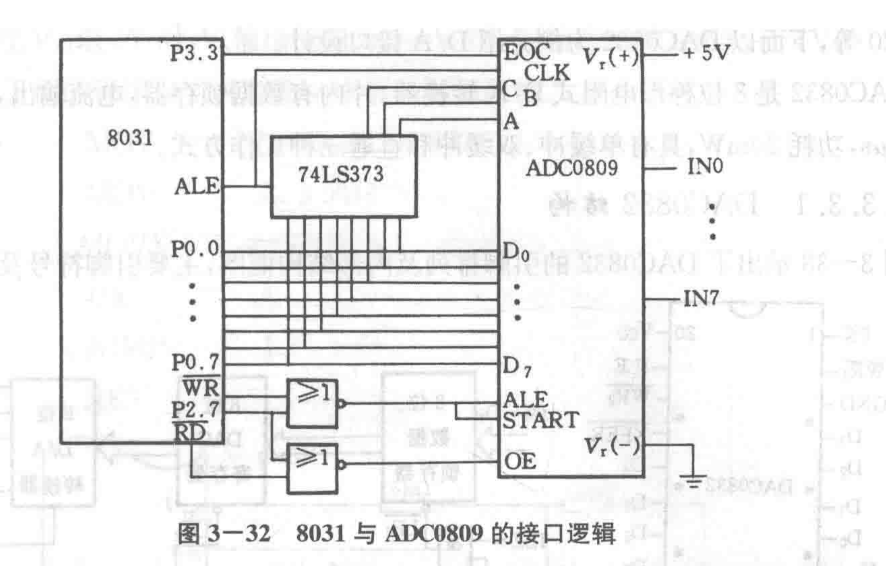


图 3－32 8031 与 ADC0809 的接口逻辑

设现有一位移测量用差动变压器，对应 0～80mm 量程，输出电压为 0～5V，要求用图 3－32中 ADC0809 的 IN2 进行 A/D 转换和采集，并将采集结果存于 8031 片内 RAM 40H 中，则相应程序可如下设计。

```
        MOV     DPTR,＃7FFAH        ;选择 IN2并启
        MOV     A,＃0FAH            ;动 A/D 转换
        MOVX    @DPTR,A
        ACALL   DL;调延时子程序
WT:     JNB     P3.3,WT             ;等待转换结束
        MOVX    A,@DPTR             ;读转换结果
        MOV     40H,A
        RET
DL:     MOV     R4,＃10H            ;延时子程序
D1:     DJNZ    R4,D1
        RET
```

在上段程序中调用了延时子程序，这是由于 EOC 信号在 A/D 转换启动后约 10μs 才变为低电平，所以必须延时后才能对 EOC 查询，这一点请在程序设计时注意。

以上介绍了两种 A/D 器件，在进行 A/D 接口设计的时候，要根据系统总体指标，合理对各环节进行精度分配，根据精度、时间等指标正确选择 A/D 器件。

3.3.3 控制量输出接口中的 D/A 转换接口设计

在机电一体化产品中，很多被控对象要求用模拟量做控制信号，如交流电动机变频调速、直流电动机调速器、滑差电动机调速器等，而计算机系统是数字系统，不能输出模拟量，这就要求控制输出接口能完成 D/A 转换。常用的 D/A 器件有 DAC0832、DAC1210、

AD7520 等，下面以 DAC0832 为例介绍 D/A 接口设计。

DAC0832 是 8 位梯形电阻式 D/A 转换器，片内有数据锁存器，电流输出，输出电流稳定时间 1μs，功耗 20mW，具有单缓冲、双缓冲和直通三种工作方式。

3.3.3.1 DAC0832 结构

图 3—33 示出了 DAC0832 的引脚排列及内部结构框图，主要引脚符号及功能如下。

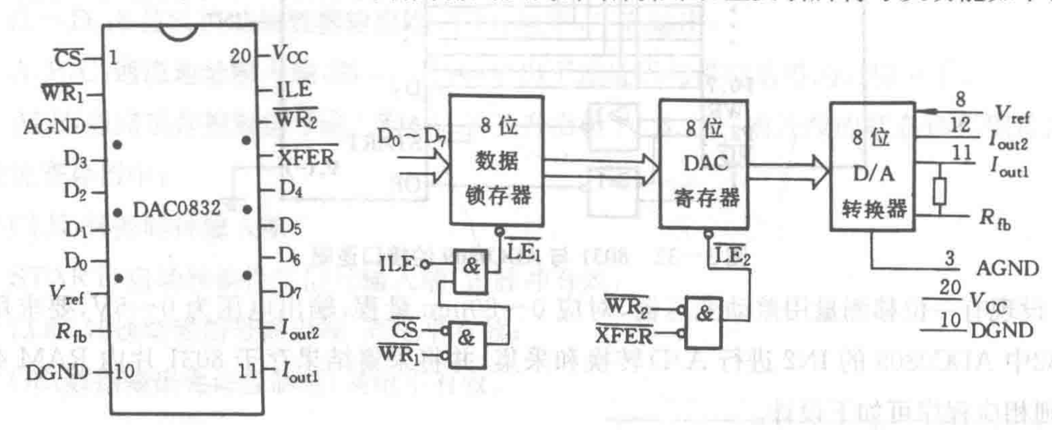


图 3—33　DAC0832 引脚排列及结构框图

$D_0 \sim D_7$：数据输入线，TTL 电平；

ILE：数据锁存允许控制信号输入线，高电平有效；

$\overline{CS}$：片选信号线，低电平有效；

$\overline{WR_1}$：输入锁存器写选通信号输入线，负脉冲有效；当 $\overline{CS}$ 为“0”，ILE 为“1”，$\overline{WR_1}$ 为“0”时，$D_0 \sim D_7$ 上的数据被锁存到输入锁存器；

$\overline{XFER}$：数据传输控制信号输入线，低电平有效；

$\overline{WR_2}$：DAC 寄存器写选通信号输入线，负脉冲有效，当 $\overline{XFER}$ 为低电平且 $\overline{WR_2}$ 有效时，输入锁存器状态被传送到 DAC 寄存器中；

I_{out1}：电流输出线，当输入数据为“0FFH”时最大；

I_{out2}：电流输出线，其值与 I_{out1} 值之和为一常数；

R_{fb}：反馈信号输入线；

V_{ref}：基准电压输入线，取值范围 −10～+10V。

3.3.3.2 D/A 输出接口电路设计

图 3—34 示出了 8031 单片机利用 DAC0832 扩展一路模拟量输出的接口电路。此电路有两个输出点，a 点电压 V_a 与输入数字量 N 之间的关系可用下式表示：

$$V_a = -V_{ref}\frac{N}{256} \tag{3-2}$$

b 点为一个相加输出点，V_b 与 V_a 关系为

$$V_b = 2V_a + V_{ref} \tag{3-3}$$

当参考电压 V_{ref} 取 5V 时，V_a 输出范围为 0～－5V；V_b 输出范围为＋5～－5V。

8031 执行下面的程序，a 点将输出一个锯齿形电压波。

```
        MOV     DPTR,#7FFFH
        MOV     A,#00H
LP:     MOVX    @DPTR,A
        INC     A
        AJMP    LP
        RET
```

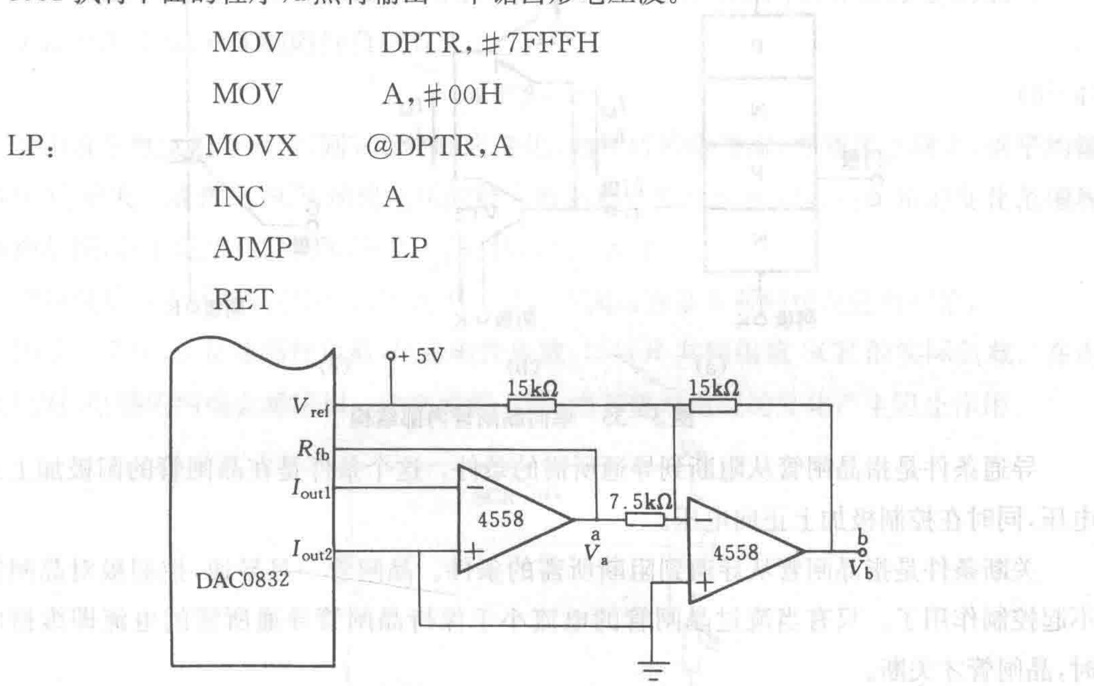


图 3－34 DAC0832 双极型电压输出接口电路

3.3.4 控制量输出接口中的功率接口设计

在机电一体化产品中，被控对象所需要的驱动功率一般都比较大，而计算机发出的数字控制信号或经 D/A 转换后所得到的模拟控制信号的功率都很小，因而必须经过功率放大后才能用来驱动被控对象。实现功率放大功能的接口电路被称为功率接口电路。本节主要介绍功率接口电路的设计方法及常用到的一些电力电子器件。

3.3.4.1 常用电力电子器件

1. 晶闸管

晶闸管又称可控硅，是目前应用最广泛的半导体功率开关元件，其控制电流可从数安培到数千安培。晶闸管的主要类型有单向晶闸管 SCR，双向晶闸管 Triac 和可关断晶闸管 GTO 等三种最基本类型，此外还有光控晶闸管、温控晶闸管等特殊类型。

(1)单向晶闸管 SCR。图 3－35 示出了单向晶闸管 SCR 的基本结构及表示符号。SCR 由三个极组成，分别称为阳极 A，阴极 K 及控制极 G(又称门极)。它有截止和导通两种稳定状态，两种状态的转换可以由导通条件和关断条件来说明。

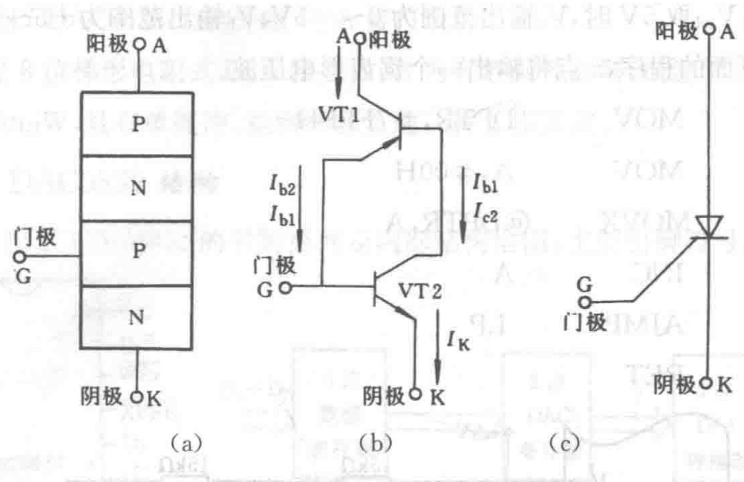


图 3—35　单向晶闸管内部结构

导通条件是指晶闸管从阻断到导通所需的条件。这个条件是在晶闸管的阳极加上正向电压，同时在控制极加上正向电压。

关断条件是指晶闸管从导通到阻断所需的条件。晶闸管一旦导通，控制极对晶闸管就不起控制作用了。只有当流过晶闸管的电流小于保持晶闸管导通所需的电流即维持电流时，晶闸管才关断。

由上述可知，当在晶闸管的阳极加上交流电压时，在电压的正半周，若给控制极加一个正触发脉冲，则晶闸管导通，而电压过零时，晶闸管将关断；在下一个正半周，若想使晶闸管导通，必须重新给控制极加触发脉冲。图 3—36(a)示出了在交流回路中，SCR 的控制方法；图 3—36(b)示出了控制极所加控制信号与负载 R 两端电压波形间关系(R 为纯阻性负载)。

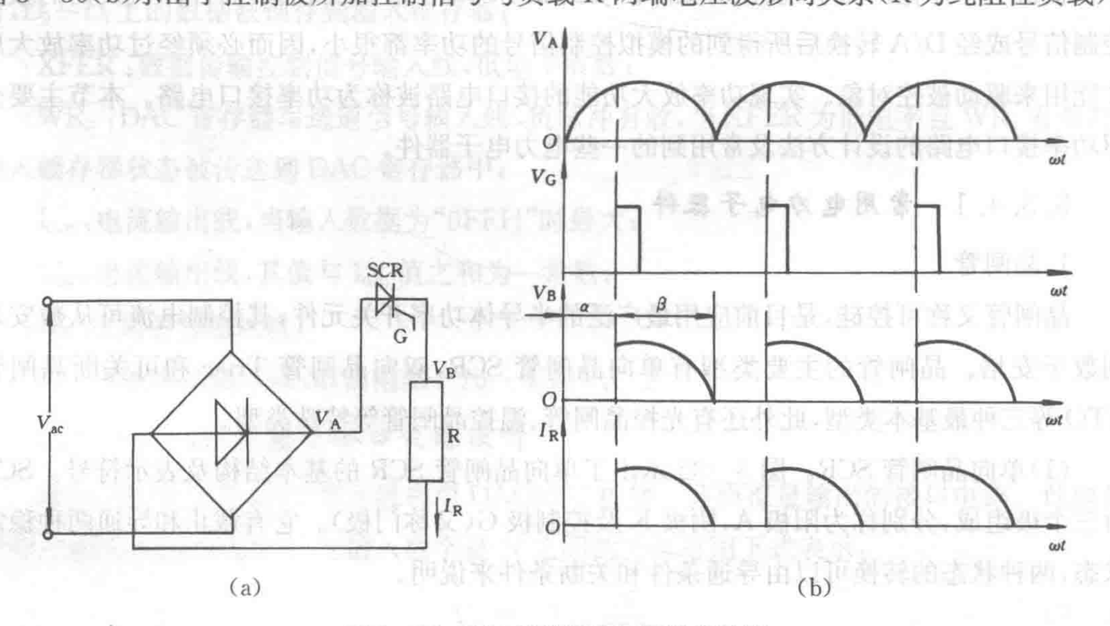


图 3—36　SCR 的控制信号及输出波形

由图 3—36(b)可见，触发信号相位的变化将引起 SCR 输出波形的变化，这里我们引入两个概念。

①控制角 α。指从零电压到被触发导通的瞬间的这段时间所对应的电度角。

②导通角 β。指从被触发导通的瞬间开始到电压为零这段时间所对应的电度角。

由以上定义知，对于纯阻性负载有

$$\alpha+\beta=\pi \tag{3-4}$$

如果改变触发信号相位，则 α、β 将随之变化，触发信号越提前，导通角 β 越大，则平均输出电压 V_s 越大。通常把 SCR 输出电压的最大值到最小值之间所对应的 α 角的变化范围称为移相范围，在上图单相整流电路中，SCR 移相范围是 180°。

当负载是一个感性负载时，情况大不一样。下面对感性负载的情况进行讨论。

图 3－37 中，L 是纯感性负载，R 是阻性负载，L 与 R 共同组成 SCR 的实际负载。在电流变化时，电感的两端会感应出一个电动势，这个电动势对电流的变化产生阻止作用。

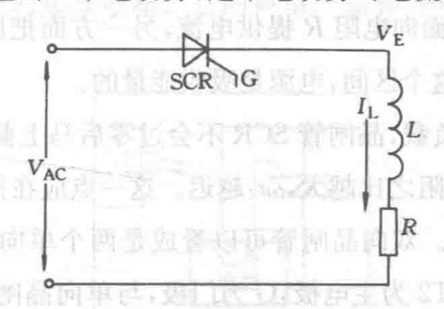


图 3－37　带电阻电感负载的单向半波整流电路

带电阻电感负载的单向半波整流电路的工作电压和电流波形如图 3－38 所示。

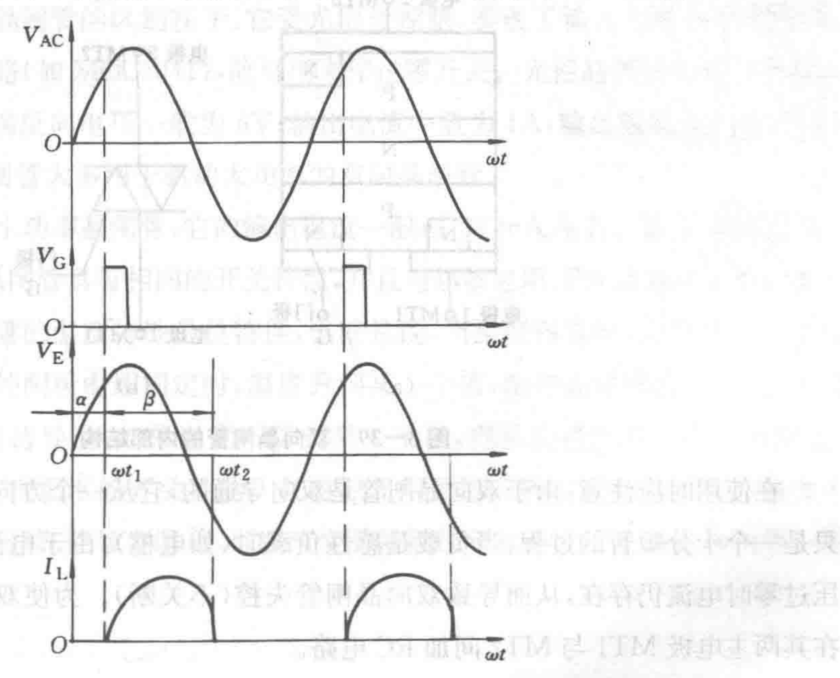


图 3－38　在电阻电感性负载电路中 SCR 的控制信号与输出波形

V_{AC} 是输入的交流电压，V_G 是控制极控制信号，V_E 是 SCR 的输出信号，即 L、R 上的电压波形，I_L 是负载电流。在 $0\sim\omega t_1$ 区间，由于没有触发信号，故 SCR 不导通，I_L 为零。在 ωt_1

时，触发信号V_G出现，SCR 导通。由于负载中含有电感L，负载中的电流不能突变，只会从零开始逐渐上升。SCR 导通之后的输出电压可以用式(3－5)表示。

$$V_E = L\frac{dI_L}{dt} + RI_L \tag{3-5}$$

因此，当在电度角π时，$V_E=0$，于是有

$$RI_L = -L\frac{dI_L}{dt} \tag{3-6}$$

式(3－6)说明在电源电压过零时，负载上的电流不为零，表明晶闸管并没有关断。当电度角为$\pi\sim\omega t_2$时，V_E变成负值，直到电度角为ωt_2时，才有$I_L=0$，这时晶闸管关断。在$\pi\sim\omega t_2$这一段时间内，电源电压虽然变为负值，但由于电感L中存储的电能尚未释放完毕，会强迫 SCR 继续导通；电感一方面向电阻R提供电流，另一方面把原来存储的电能的一部分回馈给电源。所以，在$\pi\sim\omega t_2$这个区间，电源是吸收能量的。

总之，对于电阻电感性负载，晶闸管 SCR 不会过零后马上截止，而是在负半周的某一时刻ωt_2截止，负载中电感与电阻之比越大，ωt_2越迟。这一点应在接口设计时予以考虑。

(2)双向晶闸管 TRIAC。双向晶闸管可以看成是两个单向晶闸管反向并联组成，如图3－39所示，其中 MT1 和 MT2 为主电极，G 为门极，与单向晶闸管相比，双向晶闸管的特点是：在触发后是双向导通的；门极所加触发信号可以为正也可以为负。

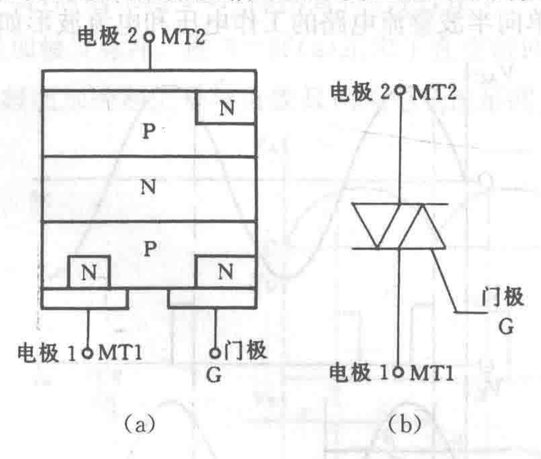


图 3－39 双向晶闸管的内部结构

在使用时应注意：由于双向晶闸管是双向导通的，它从一个方向过零进入反向阻断状态只是一个十分短暂的过程，当负载是感性负载时(如电枢)，由于电流滞后性，有可能会使电压过零时电流仍存在，从而导致双向晶闸管失控(不关断)。为使双向晶闸管能正确工作应在其两主电极 MT1 与 MT2 间加 RC 电路。

(3)门极可关断晶闸管 GTO。GTO 的内部结构及表示符号如图 3－40 所示。与 SCR 相比，GTO 有更灵活方便的控制性能，即当门极加上正控制信号时 GTO 导通；在门极加上负控制信号时 GTO 截止。

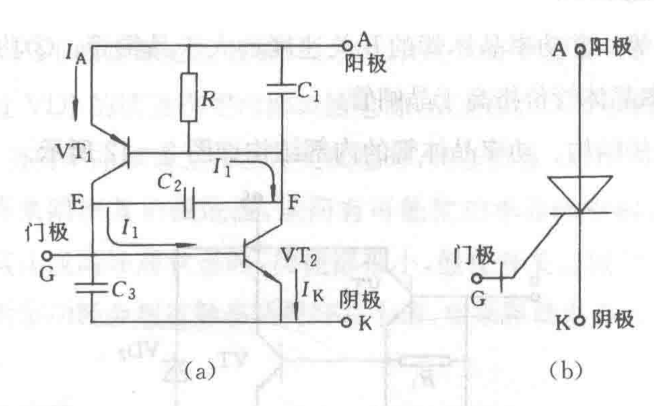


图 3—40 门极可关断晶闸管

(4)光控晶闸管与温控晶闸管。这是两类特种晶闸管。光控晶闸管是把光电耦合器件与双向晶闸管做到一起形成的集成电路。它的典型产品有 MOC3041,MOC3021 等。其结构如图 3—41 所示。

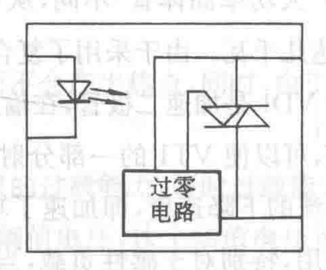


图 3—41 光控晶闸管结构

光控晶闸管与一般晶闸管的区别在于:它受光信号控制,实现了输入与输出的电隔离。有些型号内部有过零电路(如 MOC3041),故可用来作过零开关。光控晶闸管的输入电流一般为 10～100mA,输入端反向电压一般为 6V;输出电流一般为 1A,输出端耐压一般为 400～600V。因此,光控晶闸管大多用于驱动大功率的双向晶闸管。

温控晶闸管是一种小功率晶闸管,它的输出电流一般在 100mA 左右。温控晶闸管是一种温敏器件,它和普通晶闸管具有相同的开关特性,并且与热敏电阻、PN 结温度传感器相比有较多优点。温控晶闸管的温度特性是负特性,也就是说,当温度越高时,正向开关门槛电压越低。在温控晶闸管的阴极电压固定时,温度升到某一个值,温控晶闸管就会导通;温度继续上升,温控晶闸管保持导通;如果温度下降到某一个值,则温控晶闸管又会变成截止。可见,用温控晶闸管可实现温度的开关控制。在温控晶闸管的门极和阳极或阴极之间加上适当器件,如电位器、光敏管、热敏电阻等,可以改变晶闸管的导通温度值。温控晶闸管一般用于 50V 以下低压场合。

2. 功率晶体管

(1)功率晶体管的特点。所谓功率晶体管就是指在大功率范围应用的晶体管,有时也称为电力晶体管。与晶闸管相比,功率晶体管有如下特点:①大功率晶体管不仅可以工作在开关状态,而且也可以工作在模拟状态,因而有着更广的工作范围,如声频功率放大、超声波功

率放大、有源滤波器等。②功率晶体管的开关速度远大于晶闸管。③功率晶体管的控制比晶闸管容易。④功率晶体管价格高于晶闸管。

(2)功率晶体管的结构。功率晶体管的内部结构如图 3－42 所示。

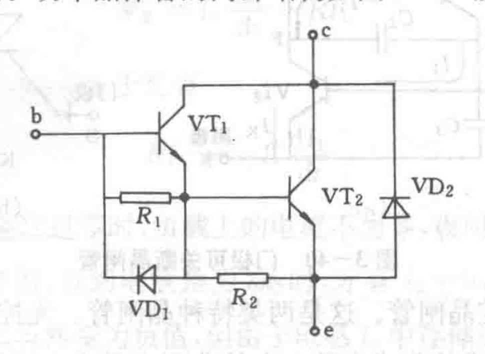


图 3－42 功率晶体管内部结构

功率晶体管和人们心目中的“大功率晶体管”不同,从本质上讲,它不是一个管子,而是一个多管复合结构,其功率可高达几千瓦。由于采用了复合结构,使功率晶体管有较大的电流放大系数。图 3－42 中二极管 VD1 是加速二极管,在输入端 b 的控制信号从高电平变成低电平的瞬间,二极管 VD1 导通,可以使 VT1 的一部分射极电流经过 VD1 流到输入端 b,从而加速了功率晶体管集电极电流的下降速度,即加速了功率晶体管的关断。VD2 是续流二极管,对晶体管 VT2 起保护作用,特别对于感性负载,当功率晶体管关断时,感性负载所存储的能量可以通过 VD2 的续流作用而泄放,从而避免对功率晶体管造成反向击穿。

(3)功率晶体管的应用。虽然功率晶体管有开关状态和模拟状态两种工作状态,但在机电产品中,它基本被用来做高速开关器件。图 3－43 是用功率晶体管做功放元件的步进电动机一相绕组的驱动电路。

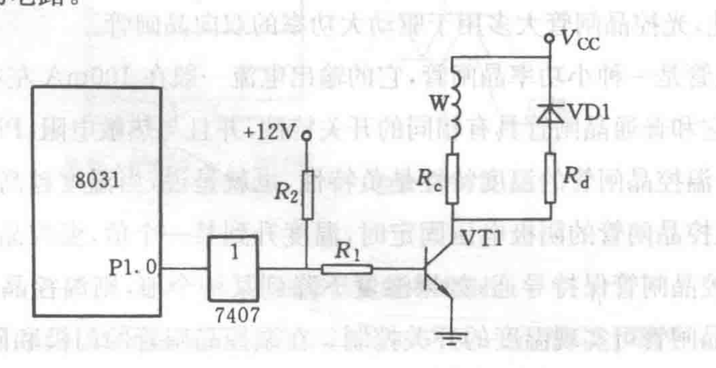


图 3－43 步进电动机一相绕组的驱动电路

图中,功率晶体管工作在开关状态,当控制微机的 I/O 口输出高电平时,经 7407 进行电流放大,使 VT1 导通,从而使步进电动机绕组 W 通电。当 P1.0 输出低电平时,VT1 截止,W 不通电。图中 R_c 为限流电阻,VD1 为续流二极管,因步进电动机绕组 W 是一个感性负载,在晶体管 VT1 从饱和突然变成截止时,绕组会产生一个很大的反电动势,这个反电动势和电源 V_{cc} 迭加在一起加在晶体管 VT1 的集电极上,很容易使功率晶体管击穿。将续流二

极管 VD1 反向接在 VT1 的集电极和电源 V_{cc}之间，使得功率晶体管 VT1 在截止瞬间，W 上产生的反电动势通过 VD1 的续流作用而回馈给电源，从而保护了晶体管 VT1 不受损坏。

应该强调一点，当功率晶体管工作在开关状态时，其基极输入电流应选得大些，否则，晶体管会增加自身压降来限制其负载电流，从而有可能使功率晶体管超过允许功率而损坏。这是因为晶体管在截止或高导通状态时，功耗都很小，但在开关过程中，晶体管可能同时出现高电压，大电流，瞬态功耗会超过静态功耗好几十倍，如果驱动电流太小，会使晶体管陷入开关过渡的危险区。

3. 功率场效应晶体管

功率场效应晶体管又称功率 MOSFET，是在大功率范围应用的场效应晶体管，在机电系统应用中，它有着比双极型功率晶体管更好的特性，主要表现在如下几个方面。

(1)由于功率场效应晶体管是多数载流子导电，故而不存在少数载流子的储存效应，从而有较高的开关速度；

(2)具有较宽的安全工作区而不会产生热点，同时，由于它具有正的电阻温度系数，所以容易进行并联使用；

(3)具有较高的可靠性和较强的过载能力，短时过载能力通常为额定值的四倍；

(4)具有较高的控制电压，即阈值电压，这个阈值电压可达 2～6V，因此，有较高的噪声容限和抗干扰能力，给电路设计带来极大的方便；

(5)由于它是电压控制器件，具有很高的输入阻抗，因此驱动电流很小，接口容易。

由于功率场效应晶体管存在这些明显的优点，所以在电机调速、开关电源等各种领域得到越来越广泛的应用。

场效应管的表示符号如图 3－44 所示，其中 G 为栅极，即控制极；S 为源极；D 为漏极。在漏极 D 与源极 S 间的反向二极管是在管子制造过程中形成的。

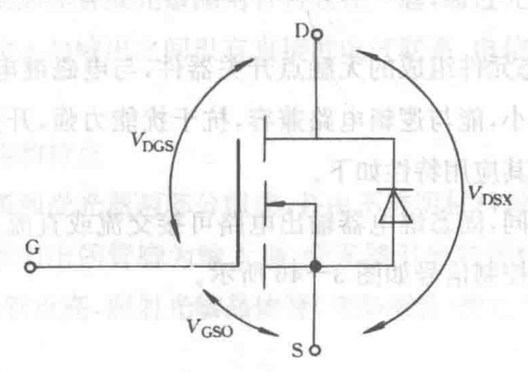


图 3－44　功率场效应晶体管表示符号

由于功率场效应管输入阻抗大，控制电压高，这使它的驱动电路相对简单。图 3－45 示出了两种驱动电路，图中 R_L为负载电阻。

由于功率场效应管绝大多数是电压控制而非电流控制，吸收电流很小，因此 TTL 集成

电路也就足以驱动大功率的场效应晶体管。又由于 TTL 集成电路的高电平输出为 3.5～5V，直接驱动功率场效应晶体管偏低一些，所以在驱动电路中常采用集电极开路的 TTL 集成电路。图 3－45(a)所示电路中，74LS07 输出高电平取决于上拉电阻 R_g 的上拉电平，为保证有足够高的电平驱动功率场效应管导通，也为了保证它能迅速截止，在实际中常把上拉电阻接到＋10～＋15V 电源。

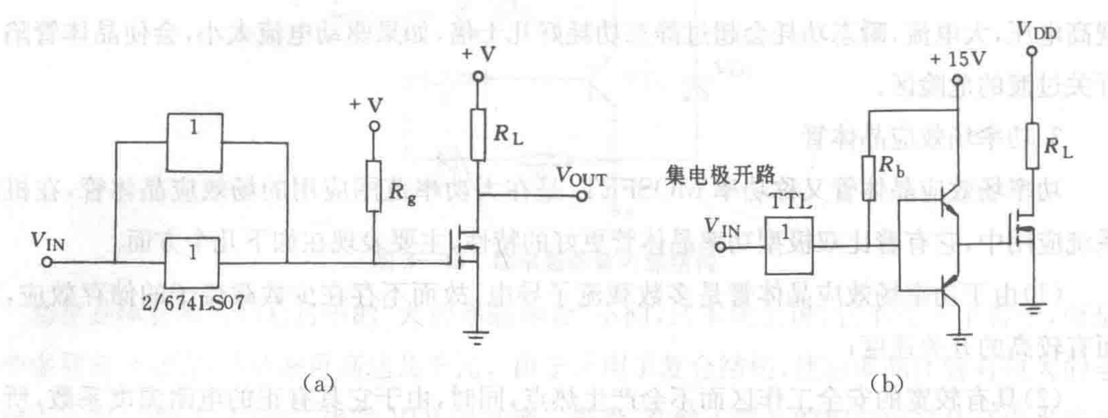


图 3－45　功率场效应管的驱动

功率场效应管的栅极 G 相对于源极 S 而言存在一个电容，即功率场效应管的输入电容，这个电容对控制信号的变化起充放电作用，即平滑作用。控制电流越大，充放电越快，功率场效应管的速度越快。故有时为了保证功率场效应管有更快的开关速度，常采用晶体管对控制电流进行放大，如图 3－45(b)所示。另外，在实际使用中，为避免干扰由执行元件处窜入控制微机，常采用脉冲变压器、光电耦合器等对控制信号进行隔离。

4. 固态继电器(SSR)

固态继电器是一种无触点功率型通断电子开关，又名固态开关。当在控制端输入触发信号后，主回路呈导通状态；无控制信号时主回路呈阻断状态。控制回路与主回路间采取了电隔离及信号耦合技术。

固态继电器是由固态元件组成的无触点开关器件，与电磁继电器相比，具有工作可靠，使用寿命长，对外界干扰小，能与逻辑电路兼容，抗干扰能力强，开关速度快，使用方便等优点。但在使用时，应考虑其应用特性如下。

(1)根据产品功能不同，固态继电器输出电路可接交流或直流，对交流负载的控制有过零与不过零控制功能，其控制信号如图 3－46 所示。

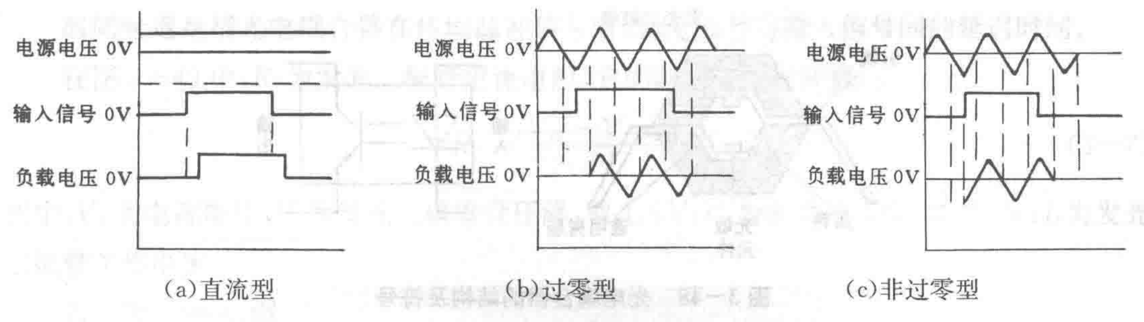


图 3－46　不同功能的固态继电器控制信号

(2)由于固态继电器是一种电子开关,故有一定的通态压降和断态漏电流。

(3)负载短路易损坏 SSR,应特别注意避免。

图 3－47 示出了 8031 单片机通过固态继电器控制一交流接触器的控制线路。

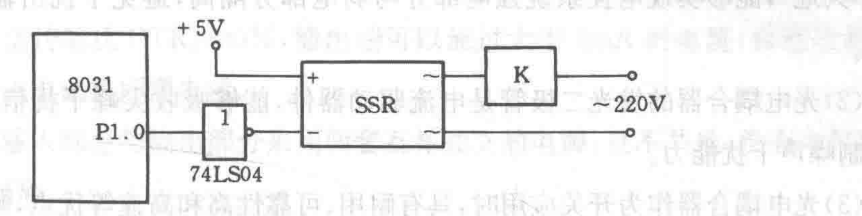


图 3－47　SSR 应用

当 8031 的 P1.0 输出高电平时,固态继电器 SSR 导通,交流接触器 K 吸合,主电路导通;当 P1.0 输出低电平时,固态继电器截止,交流接触器断开,主电路关断。

目前,国产 SSR 的驱动电流一般为 0.5～20mA,最小工作电压 3V,故可直接由 TTL 器件驱动。

3.3.4.2　光电耦合器驱动接口设计

在机电一体化产品的控制输出接口中,光电耦合器是经常使用的一类器件。光电耦合器是把发光二极管和光敏晶体管或光敏晶闸管封装在一起,通过光信号,实现电信号传递的器件。由于光电耦合器输入与输出之间没有直接的电气联系,电信号是通过光信号传递的,所以也称光电隔离器。

1. 光电耦合器的结构和特点

光电耦合器由发光源和受光器两部分组成,并由不透明材料封装在一起,其结构和符号如图 3－48 所示。发光源引出的管脚为输入端,受光器引出的管脚为输出端。当在输入端加正向电压时,发光二极管点亮,照射光敏晶体管(或晶闸管)使之导通,产生输出信号。

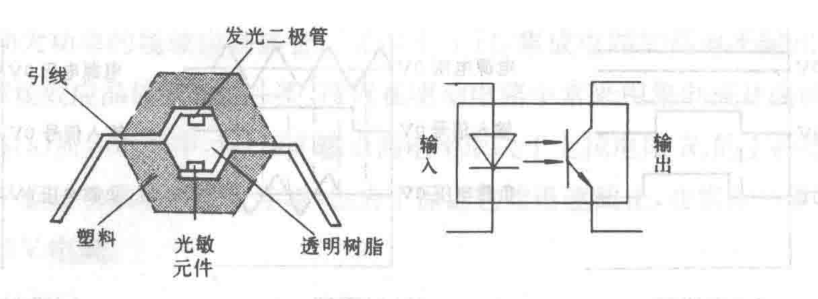


图 3—48 光电耦合器的结构及符号

光电耦合器具有如下特点。

(1)光电耦合器的信号传递采取电一光一电形式,发光部分和受光部分不接触,因此其绝缘电阻可高达 $10^{10}\Omega$ 以上,并能承受 2 000V 以上的高压。被耦合的两个部分可以自成系统不"共地",能够实现电控系统强电部分与弱电部分隔离,避免干扰由输出通道窜入控制微机。

(2)光电耦合器的发光二极管是电流驱动器件,能够吸收尖峰干扰信号,所以具有很强的抑制噪声干扰能力。

(3)光电耦合器作为开关应用时,具有耐用、可靠性高和高速等优点,响应时间一般为数微秒以内,高速型光电耦合器的响应时间有的甚至小于 10ns。

光电耦合器用途很多,如作为高压开关、信号隔离转换、脉冲系统间的电平匹配等。

2. 晶体管输出型光电耦合器驱动接口设计

在机电系统的控制输出接口设计中,晶体管输出型光电耦合器主要用于实现电信号之间的隔离。图 3—49 示出了 8031 单片机通过光耦控制步进电动机的接口电路。

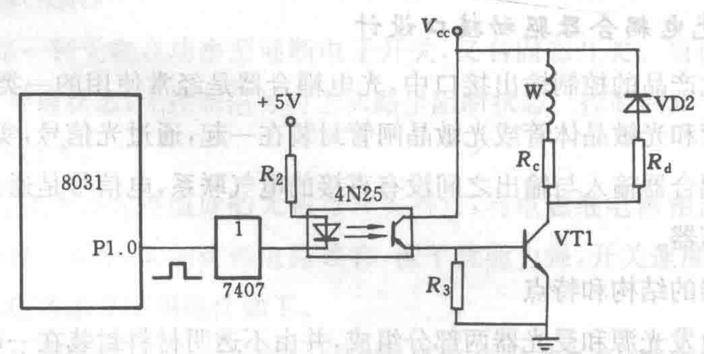


图 3—49 8031 单片机通过光耦控制步进电动机的接口电路

在这种场合应用时,应考虑两个参数:电流传输比 CTR 与时间延迟。

电流传输比是指光电晶体管的集电极电流 I_C 与发光二极管的电流 I_f 之比,不同结构的光电耦合器的电流传输比相差很大,比如输出端是单个晶体管的光电耦合器 4N25 的电流传输比 CTR≥20%,而输出端使用达林顿管的光电耦合器 4N33 的电流传输比 CTR≥500%。电流传输比受发光二极管的工作电流 I_f 影响,当 I_f 为 10～20mA 时,电流传输比最大。另外,工作温度升高时电流传输比也会下降。

时间延迟是指光电耦合器在传输脉冲信号时，输出信号与输入信号间的延迟时间。

在图 3－49 中，R_2为发光二极管限流电阻，它的取值由下式计算：

$$R_2 = \frac{V_{cc} - V_f - V_d}{I_f} \tag{3-7}$$

式中，V_{cc}为电源电压；V_f为发光二极管管压降，取 1.5V；V_d为驱动器压降，取 0.5V；I_f为发光二极管工作电流。

若 I_f取 10mA，则

$$R_2 = \frac{5 - 1.5 - 0.5}{0.01} \text{V/A} = 300\Omega$$

当 8031 的 P1.0 端输出高电平时，光电耦合器输入端电流为 0，则输出开路，晶体管 VT1 不导通，步进电动机绕组两端无电压；当 P1.0 输出低电平时，4N25 的输入电流为 10mA，4N25 的电流传输比 CTR≥20%，输出端可以流过大于 2mA 的电流，再经过晶体管放大，产生驱动步进电动机所需电流。

图 3－49 中，输入部分与输出部分采用两套互相独立的电源，且不共地，没有电气联系，从而实现了电气隔离。

3. 晶闸管输出型光电耦合器驱动接口设计

晶闸管输出型光电耦合器的输出端是光敏晶闸管或光敏双向晶闸管。光电耦合器的输入端有一定的电流流入时，晶闸管即导通。有的光电耦合器的输出端还配有过零检测电路，用于控制晶闸管过零触发，以减少用电设备在启动时对电网造成的冲击。

4N40 是常用的单向晶闸管输出型光电耦合器。当输入端有 15～30mA 电流时，输出端的晶闸管导通。输出端的额定电压为 400V，额定电流有效值为 300mA。

MOC3041 是常用的双向晶闸管输出的光电耦合器，内部带过零触发电路，输入端控制电流为 15mA，输出端额定电压为 400V，最大重复浪涌电流为 1A。

图 3－50 示出了 4N40 和 MOC3041 的接口驱动电路。由式(3－7)可求得限流电阻 R_{f1}和 R_{f2}分别为 100Ω 和 200Ω，实际取 91Ω 和 180Ω，使 I_f留有一定余量。

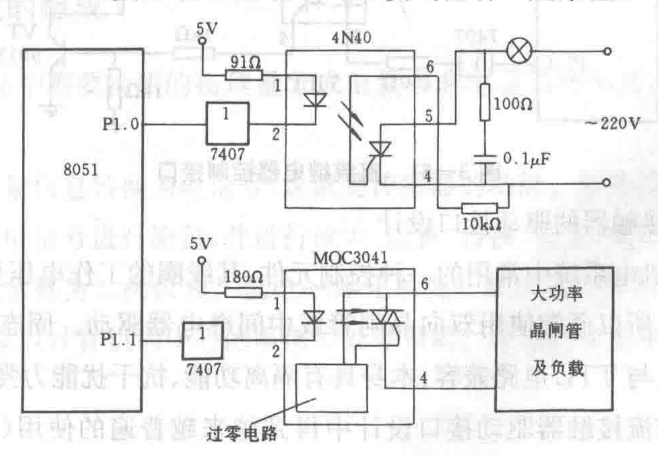


图 3－50　晶闸管输出型光电耦合器驱动接口

4N40 常用于小电流电器控制,如指示灯等,也可用于触发大功率的晶闸管。MOC3041 一般用于中间控制电路或用于触发大功率晶闸管。

3.3.4.3 继电器和接触器驱动接口设计

继电器、接触器按所用驱动电源不同有直流型和交流型之分,工作电压一般比较高,因此从计算机输出的控制信号需要经过驱动电路进行转换,使输出的驱动电压和电流能够适应继电器或接触器线圈的要求。由于继电器和接触器的线圈为感性负载,在断电瞬间会生成反电动势,所以设计驱动接口时应注意功率半导体器件如晶体管、晶闸管的过压保护。

继电器、接触器动作时,对电源有一定的干扰。为提高控制微机可靠性,在控制微机和继电器、接触器之间一般都采用光电耦合器隔离。对于一些超小型逻辑电路用继电器,由于线圈工作电流较小,对电源的影响不大,也可以不加隔离电路。

1. 直流电磁式继电器功率驱动接口设计

直流电磁式继电器功率驱动接口一般可选用晶体管或集成电路驱动。当使用继电器数目较多时,宜选用集成电路驱动器,如 ULN2003 等。一片 ULN2003 集成了七个反相驱动器,每个驱动器输出电流可达 500mA,输出端工作电压大于 50V,并且内部集成了续流二极管。

图 3－51 示出了 8031 单片机通过 P1.0 控制一直流继电器的接口电路。图中,采用光电耦合器 TIL117 进行了电气隔离,继电器的驱动由晶体管 9013 实现,光耦的驱动电流由 7407 提供。二极管 VD 的作用是保护晶体管 9013,当继电器 K 吸合时,二极管承受反向电压不导通;当继电器释放时,由于继电器线圈存在电感,会生成反电动势,这个反电动势与 V_C迭加在一起作用在 9013 集电极上,容易损坏晶体管。在线圈两端反向并联二极管 VD 后,继电器线圈产生的感应电流由二极管 VD 流过,因而不会产生很高的感应电压,从而使晶体管 9013 得到保护。

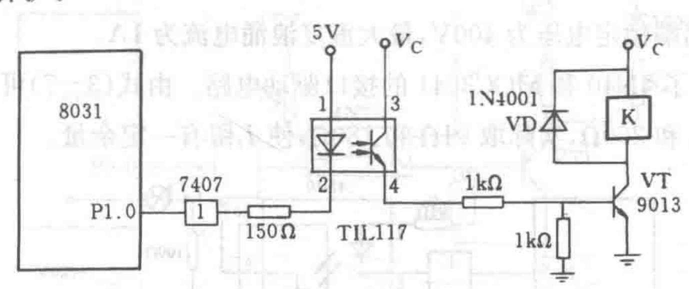


图 3－51 直流继电器控制接口

2. 电磁式交流接触器的驱动接口设计

交流接触器是机电系统中常用的一种控制元件,其线圈的工作电压要求是交流电,而且工作电流一般较大,所以通常使用双向晶闸管或中间继电器驱动。固态继电器由于具有要求输入驱动电流小、与 TTL 电路兼容、本身具有隔离功能、抗干扰能力强、无机械动作、使用寿命长等优点,在交流接触器驱动接口设计中得到越来越普遍的使用(如图 3－47 所示)。这里 SSR 应选过零触发型,因为在电源电压较低时接通用电器,对电源干扰小。



第4章 检测系统设计

4.1 概 述

在机电一体化系统中,离不开检测系统这个重要环节。若没有传感器对原始的各种参数进行精确而可靠的自动检测,那么信号转换、信息处理、正确显示、控制器的最佳控制等,都是无法进行和实现的。

检测系统是机电一体化产品中的一个重要组成部分,用于实现计测功能。在机电一体化产品中,传感器的作用就相当于人的感官,用于检测有关外界环境及自身状态的各种物理量(如力、位移、速度、位置等)及其变化,并将这些信号转换成电信号,然后再通过相应的变换、放大、调制与解调、滤波、运算等电路将有用的信号检测出来,反馈给控制装置或送去显示。实现上述功能的传感器及相应的信号检测与处理电路,就构成了机电一体化产品中的检测系统。

随着现代测量、控制及自动化技术的发展,传感器技术越来越受到人们的重视,应用越来越普遍。凡是应用到传感器的地方,必然伴随着相应的检测系统。传感器与检测系统可对各种材料、机件、现场等进行无损探伤、测量和计量;对自动化系统中各种参数进行自动检测和控制。尤其是在机电一体化产品中,传感器及其检测系统不仅是一个必不可少的组成部分,而且已成为机与电有机结合的一个重要纽带。

4.1.1 检测系统的组成

机电一体化产品中需要检测的物理量分成电量和非电量两种形式,非电量的检测系统有两个重要环节。

(1)把各种非电量信息转换为电信号,这就是传感器的功能。传感器又称为一次仪表。

(2)对转换后的电信号进行测量,并进行放大、运算、转换、记录、指示、显示等处理,称为电信号处理系统,通常称为二次仪表。机电一体化系统一般采用计算机控制方式,因此,电信号处理系统通常是以计算机为中心的电信号处理系统。非电量检测系统的结构形式如图4－1所示。

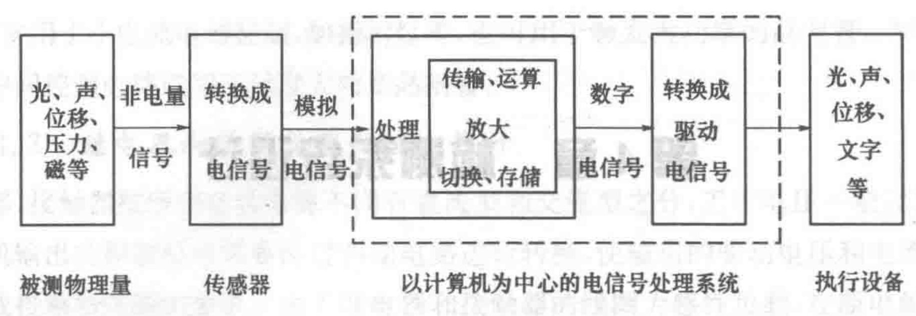


图 4—1　非电量检测系统的结构形式

对于电量检测系统,只保留了电信号的处理过程,省略了一次仪表的处理过程。

4.1.2　传感器的概念及基本特性

传感器是一种以一定的精确度将被测量转换为与之有确定对应关系的、易于精确处理和测量的某种物理量(如电量)的测量部件或装置。通常传感器是将非电量转换成电量来输出。传感器的特性(静态特性和动态特性)是其内部参数所表现的外部特征,决定了传感器的性能和精度。

4.1.2.1　传感器的构成

传感器一般是由敏感元件、转换元件和基本转换电路三部分组成,如图 4—2 所示。



图 4—2　传感器组成框图

(1)敏感元件。是一种能够将被测量转换成易于测量的物理量的预变换装置,而输入、输出间具有确定的数学关系(最好为线性),如弹性敏感元件将力转换为位移或应变输出。

(2)转换元件。是将敏感元件输出的非电物理量转换成电信号(如电阻、电感、电容等)形式。例如将温度转换成电阻变化,位移转换为电感或电容等传感元件。

(3)基本转换电路。将电信号量转换成便于测量的电量,如电压、电流、频率等。

有些传感器(如热电偶)只有敏感元件,感受被测量时直接输出电动势。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,无需基本转换电路,如压电式加速度传感器。还有些传感器由敏感元件和基本转换电路组成,如电容式位移传感器。有些传感器,转换元件不止一个,要经过若干次转换才能输出电量。大多数传感器是开环系统,但也有个别的是带反馈的闭环系统。

4.1.2.2　传感器的静态特性

传感器变换的被测量的数值处在稳定状态时,传感器的输入/输出关系称为传感器的静态特性。描述传感器静态特性的主要技术指标有:线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨率和零漂。

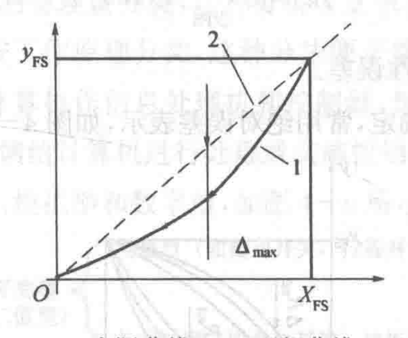
(1)线性度。传感器的静态特性是在静态标准条件下，利用一定等级的标准设备，对传感器进行往复循环测试，得到输入/输出特性(列表或画曲线)。通常希望这个特性(曲线)为线性，这对标定和数据处理带来方便。但实际的输出与输入特性只能接近线性，对比理论直线有偏差，如图 4－3 所示。实际曲线与其两个端尖连线(称理论直线)之间的偏差称为传感器的非线性误差。取其中最大值与输出满度值之比作为评价线性度(或非线性误差)的指标。

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{4-1}$$

式中，γ_L——线性度(非线性误差)；

Δ_{max}——最大非线性绝对误差；

y_{FS}——输出满度值。



1—实际曲线　2—理想曲线

图 4－3　传感器线性度示意图

(2)灵敏度。传感器在静态标准条件下，输出变化对输入变化的比值称灵敏度，用 S_0 表示，即

$$S_0 = \frac{\text{输出量的变化量}}{\text{输入量的变化量}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{4-2}$$

对于线性传感器来说，它的灵敏度 S_0 是个常数。

(3)迟滞。传感器在正(输入量增大)、反(输入量减小)行程中输出/输入特性曲线的不重合程度称迟滞，迟滞误差一般以满量程输出 y_{FS} 的百分数表示，即

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_m}{y_{FS}} \times 100\%$$

或

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_m}{y_{FS}} \times 100\% \tag{4-3}$$

式中，ΔH_m——输出值在正、反行程间的最大差值。

迟滞特性一般由实验方法确定，如图 4－4 所示。

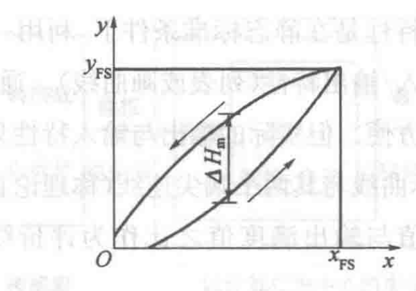


图 4—4 迟滞特性

(4)重复性。传感器在同一条件下,被测输入量按同一方向作全量程连续多次重复测量时,所得输入/输出曲线的不一致程度,称重复性,如图 4—5 所示。重复性误差用满量程输出的百分数表示,即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_m}{y_{FS}} \times 100\% \tag{4-4}$$

式中,ΔR_m——输出最大重复性误差。

重复特性也用实验方法确定,常用绝对误差表示,如图 4—5 表示。

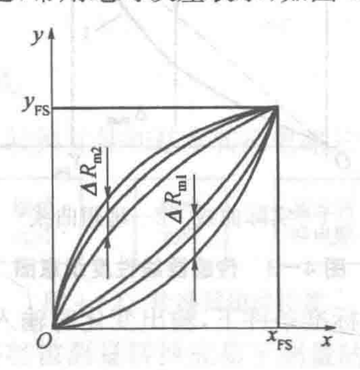


图 4—5 重复特性

(5)分辨力。传感器能检测到的最小输入增量称分辨力,在输入零点附近的分辨力称为阈值。分辨力与满度输入比的百分数表示称为分辨率。

(6)漂移。由于传感器内部因素或外界干扰的情况下,传感器的输出变化称为漂移。当输入状态为零时的漂移称为零点漂移。在其他因素不变情况下,输出随着时间的变化产生的漂移称为时间漂移;随着温度变化产生的漂移称为温度漂移。

(7)精度。表示测量结果和被测的“真值”的靠近程度。精度一般是在校验或标定的方法来确定,此时“真值”则靠其他更精确的仪器或工作基准来给出。国家标准中规定了传感器和测试仪表的精度等级,如电工仪表精度分 7 级,分别是 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5 级。精度等级(S)的确定方法是:首先算出绝对误差与输出满度量程之比的百分数,然后靠近比其低的国家标准等级值即为该仪器的精度等级。

4.1.2.3 传感器的动态特性

动态特性是指传感器测量动态信号时,输出对输入的响应特性。传感器测量静态信号

时,由于被测量不随时间变化,测量和记录过程不受时间限制。而实际中大量的被测量是随时间变化的动态信号,传感器的输出不仅需要精确地显示被测量的大小,还要显示被测量时间变换的规律,即被测量的波形。传感器能测量动态信号的能力用动态特性表示。

动态特性好的传感器,其输出量随时间的变化规律将再现输入量随时间的变化规律,即它们具有同一个时间函数。但是,除了理想情况外,实际传感器的输出信号与输入信号不会具有相同的时间函数,由此引起动态误差。

动态特性参数一般都用阶跃信号输入状态下的输出特性和不同频率信号输入状态下的幅值变化和相位变化表达。

4.1.3 传感器的分类

传感器种类多,可以按被测物理量分类,这种分类方法表达了传感器的用途,便于根据不同用途选择传感器。还可按工作原理分类,这种分法便于学习、理解和区分各种传感器。机电一体化产品主要以微型计算机作信息处理机和控制器,传感器获取的有关外界环境及自身状态变化的信息,一般反馈给计算机进行处理或实施控制。因此,这里将传感器按输出信号的性质分类,分为开关型、模拟型和数字型,如图4—6所示。

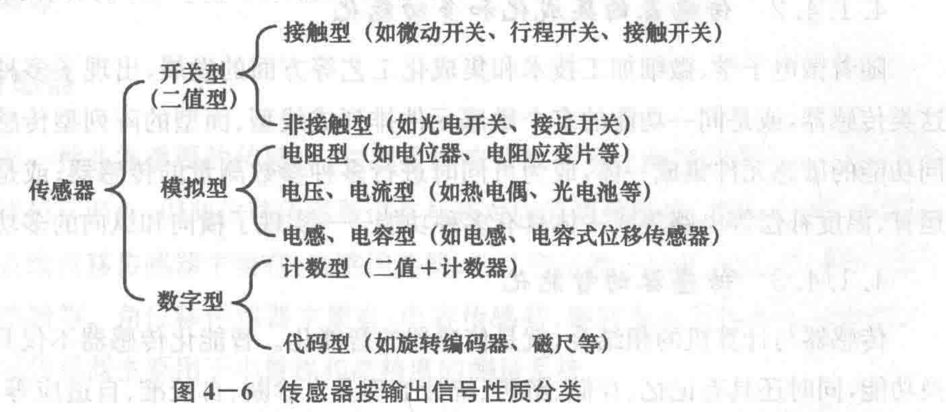


图4—6 传感器按输出信号性质分类

开关型传感器只输出“1”和“0”或开(ON)和关(OFF)两个值。如果传感器的输入物理量达到某个值以上时,其输出为“1”(ON状态),在该值以下时输出为“0”(OFF状态),其临界值就是开、关的设定值。这种“1”和“0”数字信号可直接送入微型计算机进行处理。

模拟型传感器的输出是与输入物理量变化相对应的连续变化的电量。传感器的输入/输出关系可能是线性的,也可能是非线性的。线性输出信号可直接采用,而非线性输出信号则需进行线性化处理。这些线性信号一般需进行模拟/数字转换(A/D),将其转换成数字信号后再送给微型计算机处理。

数字型传感器有计数型和代码型两大类。计数型又称脉冲计数型,它可以是任何一种脉冲发生器,所发出的脉冲数与输入量成正比,加上计数器就可以对输入量进行计数。计数型传感器可用来检测通过输送带上的产品个数,也可用来检测执行机构的位移量,这时执行机构每移动一定距离或转动一定角度就会发出一个脉冲信号,例如,光栅检测器和增量式光

电编码器就是如此。代码型传感器即绝对值式编码器,它输出的信号是二进制数字代码,每一代码相当于一个一定的输入量之值。代码的“1”为高电平,“0”为低电平,高低电平可用光电元件或机械式接触元件输出。通常被用来检测执行元件的位置或速度,如绝对值型光电编码器、接触型编码器等。

4.1.4 传感器的发展方向

由于传感器位于检测系统的入口,是获取信息的第一个环节,因此它的精度、可靠性、稳定性、抗干扰性等直接关系到机电一体化产品的整机性能指标。因此,传感器的研究与开发一直受到人们的重视,传感器的性能不断提高,主要表现在以下几个方面。

4.1.4.1 新型传感器的开发

鉴于传感器的工作机理是基于各种效应和定律,由此启发人们进一步发现新现象、采用新原理、开发新材料、采用新工艺,并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器,这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。传感器正经历着从以结构型为主转向以物性型为主的过程。

4.1.4.2 传感器的集成化和多功能化

随着微电子学、微细加工技术和集成化工艺等方面的发展,出现了多种集成化传感器。这类传感器,或是同一功能的多个敏感元件排列成线型、面型的阵列型传感器;或是多种不同功能的敏感元件集成一体,成为可同时进行多种参数测量的传感器;或是传感器与放大、运算、温度补偿等电路集成一体具有多种功能——实现了横向和纵向的多功能。

4.1.4.3 传感器的智能化

传感器与计算机的相结合,就是传感器的智能化。智能化传感器不仅具有信号检测、转换功能,同时还具有记忆、存储、解析、统计处理及自诊断、自校准、自适应等功能。如进一步将传感器与计算机的这些功能集成于同一芯片上,就成为智能传感器。

4.1.5 信号传输与处理电路

传感器输出信号一般比较微弱(mV、μV 级),有时夹杂其他信号(干扰或载波),因此,在传输过程中,需要依据传感器输出信号的具体特征和后端系统的要求,对传感器输出信号进行各种形式的处理,如阻抗变换、电平转换、屏蔽隔离、放大、滤波、调制、解调、A/D 和 D/A 转换器等,同时还要考虑在传输过程中可能受到的干扰影响,如噪声、温度、湿度、磁场等,采取一定的措施,传感器信号处理电路的内容要依据被测对象的特点和环境条件来决定。

传感器信号处理电路内容的选择所要考虑的主要问题如下。

(1)传感器输出信号形式,是模拟信号还是数字信号,电压还是电流。

(2)传感器输出电路形式,是单端输出还是差动输出。

(3)传感器电路输出能力,是电压还是功率,输出阻抗大小。

(4)传感器的特性,如线性度、信噪比、分辨率。

由于电子技术的发展和微加工技术的应用,现在的许多传感器中已经配置了部分处理电路(或配置有专用处理电路),大大简化了设计和维修人员的技术难度。例如:反射式光电开关传感器中集成了逻辑控制电路;压力传感器的输出连接专用接口处理电路后可以直接输送给 A/D 转换器;光电编码传感器的输出是 5V 的脉冲信号,可以直接传送给计算机。

4.2 常用的传感器和信号输出类型

传感器在机电一体化产品中是不可缺少的部分,它是整个系统的感觉器官,监视着整个系统的工作过程。在闭环伺服系统中,传感器用作反馈元件,其性能直接影响到工作机械的运动性能、控制精度和智能水平,因而要求传感器灵敏度高、动态特性好,特别要求其性能稳定可靠、抗干扰性能强,且能适应不同的环境。目前市场上出售的传感器类型虽然很多,在机电一体化系统中常用的主要有位移传感器、速度传感器、位置传感器、压力传感器、红外传感器和声音传感器等。

4.2.1 位移传感器

位移传感器是一种非常重要的传感器,它直接影响着数控系统的控制精度。位移可以分为角位移和直线位移两种,因此位移传感器也有与其对应的两种形式:直线位移传感器和角位移传感器。直线位移传感器主要有:电感传感器、差动变压器传感器、电容传感器、感应同步器和光栅传感器等。角位移传感器主要有:电容传感器、旋转变压器和光电编码盘等。电感传感器和电容传感器主要用于小量程和高精度的测量系统。

4.2.1.1 **电感传感器**

电感传感器是一种把微小位移变化量转变为电感变化量的位移传感器,它具有结构简单、精度高、性能稳定和工作可靠等优点,在主动量仪和其他自动检测系统中得到了广泛的应用。

对于一个 N 匝并带有磁芯的线圈(见图 4—7),其电感量 L 为

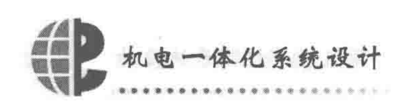
$$L = \frac{N^2 A}{\delta} \mu_0 \tag{4—5}$$

式中,δ——两个导磁磁芯之间的气隙厚度;

A——磁芯截面积;

μ_0——空气磁导率,其值为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{H/m} \tag{4—6}$$



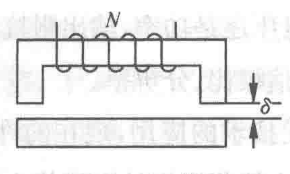
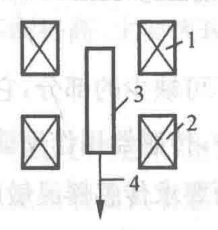


图 4—7　线圈

因此，可通过改变 δ 来反映电感 L 的变化，并根据这个原理构成气隙型传感器；也可根据截面积变化引起电感 L 变化的原理构成截面型和磁芯型传感器。

磁芯型电感传感器的原理如图 4—8 所示。线圈 1 和 2 对称放置，连成差动形式，其目的主要是为了提高灵敏度和线性度，增强抗干扰能力。



1、2—线圈　3—磁芯　4—测杆

图 4—8　磁芯型电感传感器原理

由图 4—8 可以看出，当磁芯由测杆带动在由线圈 1、2 组成的管中上下移动时，必然使线圈 1 和 2 的电感量发生变化，并且当线圈 1 中的电感量增加时，线圈 2 中的电感量减少；反之亦然。为了能把这种变化量反映出来，一般都采用如图 4—9 所示的桥式电路。

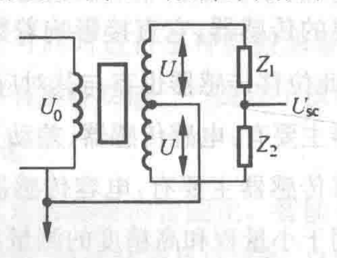


图 4—9　桥式电路

电桥的四个臂由传感器的两个线圈（阻抗为 Z_1 和 Z_2）及变压器的两个线圈（将次级线圈一分为二）所构成。电桥的输入信号为 U_0（其频率一般由几千赫兹到几万赫兹）。假定次级输出电压为 $2U$，则在忽略变压器输出阻抗的情况下，桥路电流为

$$I = \frac{2U}{Z_1 + Z_2} \tag{4—7}$$

输出电压为

$$U_{sc} = U - IZ_1 = U - \frac{2UZ_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}U \tag{4—8}$$

从式(4—8)中可以看出：当磁芯处于中间位置，即 $Z_1 = Z_2$ 时，则 $U_{sc} = 0$，这说明桥路平衡，无输出；当磁芯向下移动时，下面线圈的阻抗增高，则 $Z_2 = Z + \Delta Z$，上面线圈的阻抗减少，即 $Z_1 = Z - \Delta Z$，代入式(4—8)后便可得

$$U_{sc}=\frac{\Delta Z}{Z}U \tag{4-9}$$

反之，当铁芯向上移动同样距离时，则 $Z_1=Z+\Delta Z, Z_2=Z-\Delta Z$，代入式(4－8)后，有

$$U_{sc}=\frac{-\Delta Z}{Z}U \tag{4-10}$$

比较式(4－9)和式(4－10)可以看出：输出电压 U_{sc} 幅值相等，方向相反。由于 U 是一个幅值变化的交流信号，因此需要解调。

如果采用无相位鉴别的整流器进行解调，则输出电压与位移的关系曲线如图4－10所示。图中残余电压是由两线圈中损耗电阻 R_s 的不平衡而引起的。因为 R_s 与激励信号的频率有关，所以当激励电压中包含有高次谐波时，往往输出端的残余电压会增大。

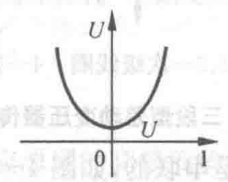


图4－10　电压与位移关系曲线(无相位鉴别)

由于用这种方法对于正负位移所得的是一个同极性的输出电压，因此不能辨别方向。为了克服上述缺点，一般都需要使用能反映极性的相敏整流法，它的输出特性曲线如图4－11所示。

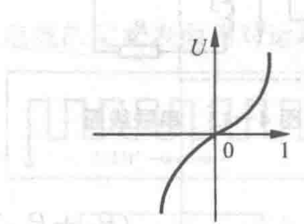


图4－11　电压与位移关系曲线(相敏整流法)

4.2.1.2　*差动变压器传感器*

电感传感器是把位移量的变化变为线圈电感量的变化，而差动变压器则是把位移量的变化转变为两个线圈之间的互感变化。

图4－12所示为一个三段型差动变压器传感器的原理。线圈分为初级线圈和次级线圈2、3，线圈中心插入圆柱形铁芯。当初级线圈中加入交流电压 U_0 时，线圈中有交流电流 i_1 流过，便产生磁通 Φ_{12} 通过线圈2，在线圈2中产生感应电势 E_2；另一部分磁通 Φ_{13} 则通过线圈3，并在其中产生感应电势 E_3，分别为

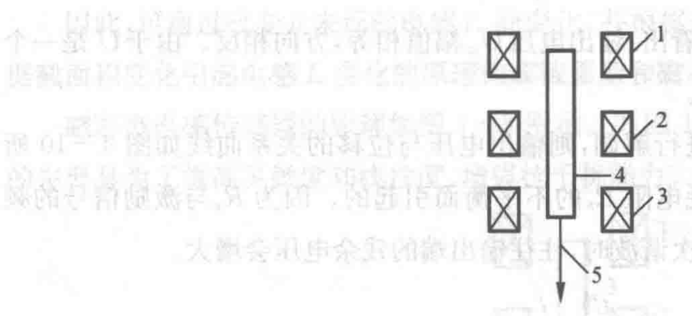
$$E_2=-\frac{\mathrm{d}\Phi_{12}}{\mathrm{d}t},\ E_3=-\frac{\mathrm{d}\Phi_{13}}{\mathrm{d}t}$$

假定 M_{12} 和 M_{13} 分别为初级线圈1对次级线圈2和次级线圈3的互感系数，则根据定义有

$$M_{12} = -\frac{\Phi_{12}}{i_1}, M_{13} = -\frac{\Phi_{13}}{i_1}$$

代入电势 E 的表达式后得

$$E_2 = -M_{12}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}, E_3 = -M_{13}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$



1—初级线圈　2、3—次级线圈　4—铁芯　5—测杆

图 4－12　三段型差动变压器传感器原理

通常,传感器的两个次级线圈都是串联的,如图 4－13 中的虚线框所示。

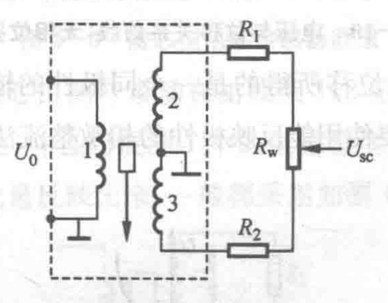


图 4－13　串联线圈

整个电路为桥式,其输出电压

$$U_{sc} = U_0 - \frac{U_0 + E_2}{R_1 + R_w + R_2}(R_1 + R_{w1}) = \frac{(R_2 + R_{w2})U_0 - (R_1 + R_{w1})E_2}{R_1 + R_w + R_2}$$

当 $R_2 + R_{w2} = R_1 + R_{w1}$ 时,则

$$U_{sc} = \frac{1}{2}(U_0 - E_2) = \frac{1}{2}(M_{13} - M_{12})\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \qquad (4-11)$$

显然,当铁芯在中间位置时,则 $M_{12} = M_{13}$,于是 $U_{sc} = 0$;当铁芯向上移动时,则 $M_{12} > M_{13}$,于是 $U_0 > E_2$,$U_{sc} \neq 0$;反之,$U_0 < E_2$,$U_{sc} \neq 0$。U_{sc} 随铁芯偏离中点的距离增大而增大,它是一个调幅正弦信号,可以用与电感传感器相同的方法来处理。

4.2.1.3　电容传感器

电容式传感器是将被测非电量的变化转换为电容量变化的一种传感器。这种传感器具有结构简单,分辨力高,可实现非接触测量,并能在高温、辐射和强烈振动等恶劣条件下工作等优点,因此在自动检测中得到了普遍应用。

现以平板式电容器来说明电容式传感器的工作原理。电容是由两个金属电极和中间的

一层电解质构成的，当两极板间加上电压时，电极上就会储存电荷，所以电容器实际上是一个储存电场能的元件。平板式电容器在忽略边缘效应时，其电容量可表示为

$$C=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r A}{\delta} \tag{4-12}$$

式中，ε_0——真空介电常数，等于 8.85×10^{-12} F/m；

ε_r——极板间介质的相对介电常数；

A——极板的有效面积(mm^2)；

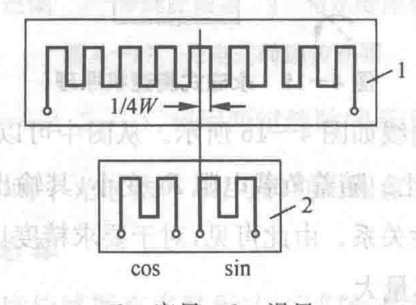
δ——两极板间的距离(mm)。

从式(4－12)可知，当其中的δ、A、ε_r三个变量中任意一个发生变化时，都会引起电容量的变化，通过测量电路就可转换为电量输出。根据上述工作原理，电容式传感器可分为变极距型、变面积型和变介质型三种类型。

4.2.1.4　感应同步器

感应同步器是一种应用电磁感应原理的高精度检测元件，它有直线和圆盘式两种，分别用来检测直线位移和角位移。

直线感应同步器由定尺和滑尺两部分组成。定尺较长(200mm 以上，可根据测量行程的长度选择不同规格长度)，上面刻有节距均匀的绕组；滑尺表面刻有两个绕组，即正弦绕组和余弦绕组，如图 4－14 所示。当余弦绕组与定子绕组相位相同时，正弦绕组与定子绕组错开 1/4 节距(W)。滑尺在通有电流的定尺表面相对运动，产生感应电势。



1—定尺　2—滑尺

图 4－14　直线感应同步器

圆盘式感应同步器的转子相当于直线感应同步器的滑尺，定子相当于定尺。

感应同步器根据其激磁绕组供电电压形式不同，分为鉴相测量方式和鉴幅测量方式。

4.2.1.5　光栅

光栅是一种新型的位移检测元件，它的特点是测量精度高(可达$\pm1\mu m$)、响应速度快和量程范围大等。光栅由主光栅、指示光栅、光源和光电器件四部分组成，主光栅和指示光栅的光刻密度相同，但体长相差较大，光栅条纹密度一般可为 25 条/mm、50 条/mm、100 条/mm、250 条/mm 等。

把指示光栅平行地放在主光栅侧面，并使它们的刻线相互倾斜一个很小的角度，这时在

指示光栅上就出现几条较粗的明暗条纹，称为莫尔条纹。它们是沿着与光栅条纹几乎成垂直的方向排列，主光栅和被测物体相连，它随被测物体的直线位移而产生移动。当主光栅产生位移时，莫尔条纹便随着产生上、下位移。用光电器件记录下莫尔条纹通过某点的数目，便可知主光栅移动的距离，也就测得了被测物体的位移量。

4.2.2 速度、加速度传感器

4.2.2.1 直流测速机速度检测

直流测速机是一种测速元件，它实际上就是一台微型的直流发电机。根据定子磁极激磁方式的不同，直流测速机可分为电磁式和永磁式两种；以电枢的结构不同来分，直流测速机可分为无槽电枢、有槽电枢、空心杯电枢和圆盘电枢等。近年来，又出现了永磁式直线测速机。常用的为永磁式测速机。

测速机的结构有多种，但原理基本相同。图 4－15 所示为永磁式测速机原理。恒定磁通由定子产生，当转子在磁场中旋转时，电枢绕组中即产生交变的电势，经换向器和电刷转换成与转子速度成正比的直流电势。

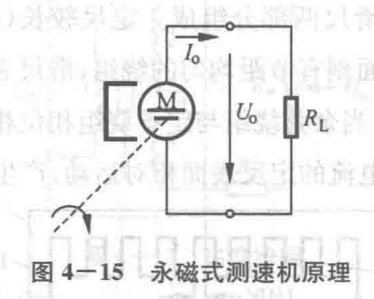


图 4－15 永磁式测速机原理

直流测速机的输出特性曲线如图 4－16 所示。从图中可以看出，当负载电阻 $R_L\to\infty$ 时其输出电压 U_o 与转速 n 成正比。随着负载电阻 R_L 变小，其输出电压下降，而且输出电压与转速之间并不能严格保持线性关系。由此可见，对于要求精度比较高的直流测速机，除采取其他措施外，负载电阻 R_L 应尽量大。

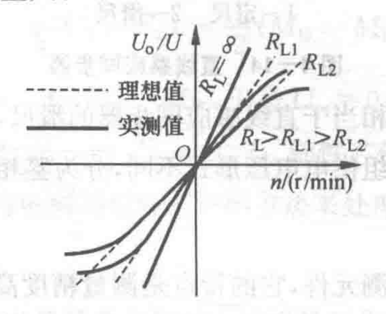


图 4－16 直流测速机输出特性曲线

直流测速机的特点是输出斜率大、线性好，但由于有电刷和换向器，构造和维护比较复杂，摩擦转矩较大。

直流测速机在机电一体化系统中，主要用作测速和校正元件。在使用中，为了提高检测

灵敏度，尽可能把它直接连接到电动机轴上。有的电动机本身就已安装了测速机。

4.2.2.2 光电式转速传感器

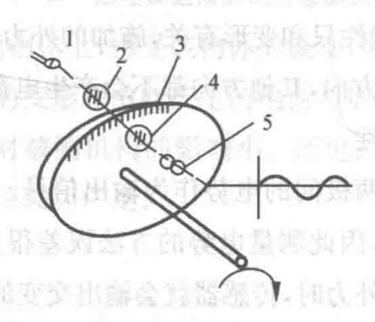
光电式转速传感器是一种角位移传感器，由装在被测轴（或与被测轴相连接的输入轴）上的带缝隙圆盘和光源、光电器件和指示缝隙盘组成，如图 4—17 所示。光源发生的光通过缝隙圆盘和指示缝隙照射到光电器件上。当缝隙圆盘随被测轴转动时，由于圆盘上的缝隙间距与指示缝隙的间距相同，因此圆盘每转一周，光电器件就输出与圆盘缝隙数相等的电脉冲，根据测量单位时间内的脉冲数 N，则可测出转速为

$$n = \frac{60N}{Zt} \tag{4-13}$$

式中，Z——圆盘上的缝隙数；

n——转速(r/min)；

t——测量时间(s)。



1—光源 2—透镜 3—带缝隙圆盘 4—指示缝隙盘 5—光电器件

图 4—17 光电式转速传感器

一般取 $Z=60\times10^m$ ($m=0,1,2,\cdots$)，利用两组缝隙间距 W 相同，位置相差 $\left(\frac{i}{2}+\frac{1}{4}\right)W$ ($i=0,1,2,\cdots$) 的指示缝隙和两个光电器件，则可辨别出圆盘的旋转方向。

4.2.2.3 加速度传感器

作为加速度检测的加速度传感器有多种形式，它们都是利用惯性质量受加速度所产生的惯性力而具有的各种物理效应，进一步转化成电量来间接度量被测加速度的。最常用的有应变式、电磁感应式、压电式传感器等。

应变式加速度传感器是通过测试惯性力引起弹性敏感元件的变形，换算出力的关系的；电磁感应式加速度传感器是借助弹性元件在惯性力的作用下，变形位移引起气隙的变化导致的电磁特性；压电式加速度传感器是利用某些材料在受力变形的状态下产生电的特性的原理。下面介绍压电式传感器原理及使用方法。

1. 压电效应及压电材料

当某些材料沿某一方向施加压力或拉力时，会产生变形，并在材料的某一相对表面产生符号相反的电荷；当去掉外力后，它又重新回到不带电荷的状态。这种现象称为压电效应，

具有压电效应的材料称为压电材料。另外，当给压电材料的某一方向施加电场时，压电材料会产生相应的变形，这是压电材料的逆压电效应。

常见的压电材料有单晶体结构的石英晶体和多晶体结构的人造压电陶瓷（如钛酸钡和锆钛酸铅等）。压电材料的压电效应具有方向性，特别是石英晶体（SiO_2）的分子及原子排列结构，使得石英晶体的压电方向是天然确定的。图 4—18 所示为晶体切片在 z 方向和 y 方向上受压力和拉力时产生电荷的情况。

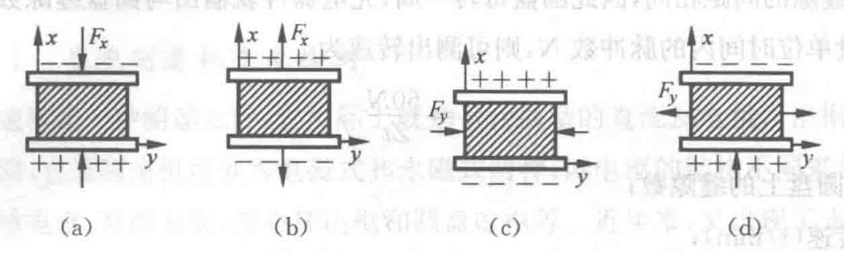


图 4—18　晶体切片受力时产生电荷的方向

实际上，压电材料的压电特性只和变形有关，施加的外力是产生变形的手段。石英晶体产生压电效应的方向只有 x 轴方向，其他方向都不会产生电荷。

2. 压电式传感器结构及特性

压电式传感器是以电荷或两极间的电势作为输出信号。当测试静态信号时，由于任何阻抗的电路都会产生电荷泄漏，因此测量电势的方法误差很大，只能采用测量电荷的方法。当给压电式传感器施加交变的外力时，传感器就会输出交变的电动势，信号处理电路相对简单，因此压电式传感器适合测试动态信号，且其频率越高越好。

压电式传感器结构一般由两片或多片压电晶体黏合而成。由于压电晶片有电荷极性，因此接法上分成并联和串联两种（见图 4—19）。并联接法虽然输出电荷大，但由于本身电容也大，故时间常数大，可以测量变化较慢的信号，并以电荷作为输出参数测量。串联接法输出电压高，本身电容小，适应以电压输出的信号和测量电路输出阻抗很高的情况。

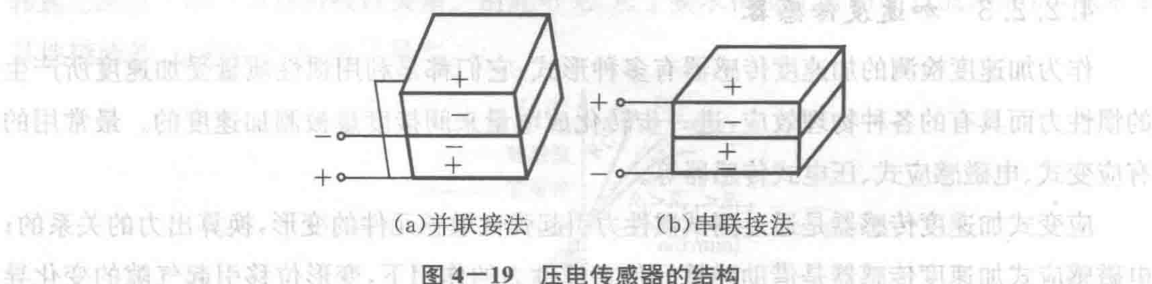


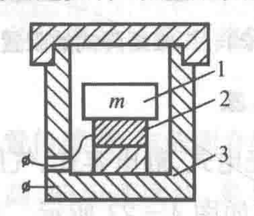
图 4—19　压电传感器的结构

由于压电式传感器输出的信号较弱，且以电荷为表现形式，因此测量电路必须进行信号放大。当采用测量电势的方法时，测量电路要配置高阻抗的前置电压放大器和一般放大器，其中高阻抗的前置电压放大器的作用是减缓电流的泄漏速度，一般放大器的作用是将高阻抗输出变为低阻抗输出。当采用电荷测试方法时，测量电路采用的是电荷放大的原理。目前，压电式传感器应用相当普遍，且生产厂家都专门配备有传感器处理电路。

3. 压电式传感器应用

压电式传感器可以用在压力和加速度检测、振动检测、超声波探测等方面，还可以应用在拾音器、助听器、点火器等产品中。

压电加速度测试传感器结构如图 4－20 所示。当加速运动时，质量块 1 产生的惯性力加载在压电材料切片 2 上，电荷(或电势)输出端输出压电信号。该压电传感器由两片压电材料切片组成，下面一片的输出引线通过壳体与电极平面相连。



1—质量块　2—压电材料切片　3—固定外壳

图 4－20　压电加速度测试传感器结构

使用时，传感器固定在被测物体上，感受该物体的振动，惯性质量块产生惯性力，使压电元件产生变形。压电元件产生的变形和由此产生的电荷与加速度成正比。压电加速度传感器可以做得很小，质量很小，故对被测机构的影响小。压电式加速度传感器的频率范围广、动态测量范围宽、灵敏度高，应用较为广泛。

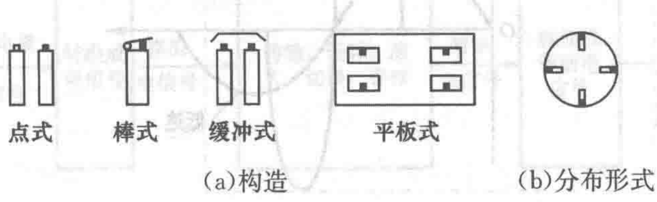
4.2.3　位置传感器

位置传感器和位移传感器不一样，它的任务不是检测一段距离的变化量，而是通过检测，判断检测量是否已到达某一位置。所以，不需要产生连续变化的模拟量，只需产生能反映某种状态的开关量即可。这种传感器常被用在机床上以进行刀具、工件或工作台的到位检测或行程限制，也经常用在工业机器人上。位置传感器分接触式和接近式两种。接触式位置传感器是能获取两个物体是否已接触的信息的一种传感器；接近式位置传感器是用来判别某一范围内是否有某一物体的一种传感器。

4.2.3.1　接触式位置传感器

这类传感器用微动开关之类的触点器件便可构成，它分以下两种。

(1)由微动开关制成的位置传感器。它用于检测物体的位置，有如图 4－21 所示的几种构造和分布形式。



(a)构造　　(b)分布形式

图 4－21　微动开关制成的位置传感器

(2)二维矩阵式配置的位置传感器。如图 4－22 所示，它一般用于机器人手掌内侧，在

手掌内侧常安装有多个二维触觉传感器，用以检测自身与某一物体的接触位置、被握物体的中心位置和倾斜度，甚至还可识别物体的大小和形状。

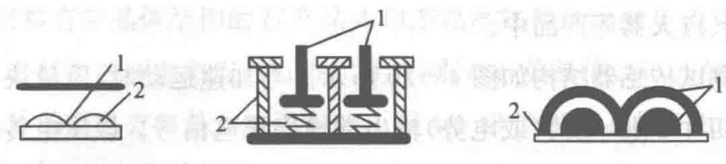


图 4—22　二维矩阵式的配置传感器

4.2.3.2　接近式位置传感器

接近式位置传感器分电磁式、光电式、静电容式、气压式、超声波式等。

这几种传感器的基本工作原理如图 4—23 所示。在此介绍使用最常用的电磁式传感器，它的工作原理如下：当一个永久磁铁或一个通有高频电流的线圈接近一个铁磁体时，它们的磁力线分布将发生变化，因此，可以用另一组线圈检测这种变化。当铁磁体靠近或远离磁场时，它所引起的磁通量变化将在线圈中感应出一个电流脉冲，其幅值正比于磁通的变化率。

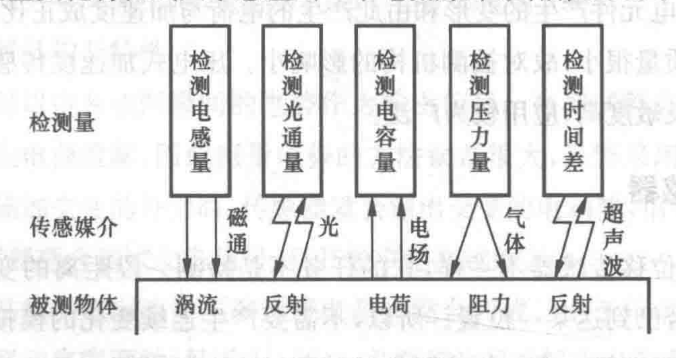


图 4—23　接近式位置传感器工作原理

图 4—24 所示为线圈两端的电压随铁磁体进入磁场的速度而变化的曲线，其电压极性取决于物体进入磁场还是离开磁场。因此，对此电压进行积分便可得出一个二值信号。当积分值小于某一特定的阈值时，积分器输出为低电平；反之，则输出高电平，此时表示已接近某一物体。

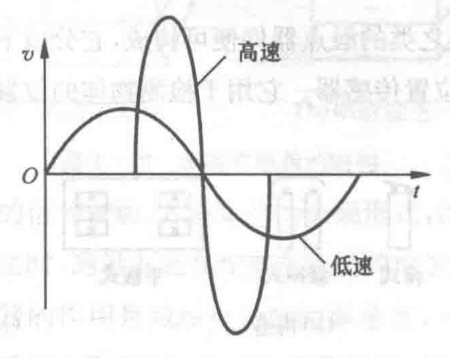


图 4—24　电压—速度曲线

显然，电磁感应式传感器只能检测电磁材料，对其他非电磁材料则无能为力。而电容式

传感器却能克服以上缺点，它几乎能检测所有的固体和液体材料。电容式接近传感器是一个以电极为检测端的静电电容式接近开关，它由高频振荡电路、检波电路、放大电路、整形电路及输出电路组成。平时检测电极与大地之间存在一定的电容量，它成为振荡电路的一个组成部分。当被检测物体接近检测电极时，由于检测电极加有电压，检测物体就会受到静电感应而产生极化现象。被测物体越靠近检测电极，检测电极上的电荷越多，由于检测电极的静电电容 $C=q/U$，所以电荷增多，使电容 C 随之增大，从而使振荡电路的振荡减弱，甚至停止振荡。振荡电路的振荡与停振两种状态被检测电路转换为开关信号后向外输出，由此即可判断被检测物体的相对位置。

现在使用较多的还有光电式位置传感器，与前面介绍的几种传感器相比，这种传感器具有体积小、可靠性高、检测位置精度高、响应速度快，易与 TTL 及 CMOS 电路兼容等优点。它分为透光型和反射型两种。

4.3 检测信号处理技术

4.3.1 检测信号概述

传感器输出信号一般比较微弱，有时夹杂其他信号（干扰或载波），因此，在传输过程中，需要依据传感器输出信号的具体特征和后端系统的要求，对传感器输出信号进行各种形式的处理，如阻抗变换、电平转换、屏蔽隔离、放大、滤波、调制、解调、A/D 和 D/A 等，同时还要考虑在传输过程中可能受到的干扰影响，如噪声、温度、湿度、磁场等，采取一定的措施，传感器信号处理电路的内容要依据被测对象的特点和环境条件来决定。

4.3.1.1 检测系统的组成

检测系统是机电一体化产品的必备组成之一，可对产品的外界环境和工作状态进行检测。测量的物理量一般为：温度、流量、功率、位移、加速度等，这些非电量的检测系统首先通过传感器把各种非电量信息转化为电信号，再根据产品需求对转换后的电信号进行处理。非电量检测系统的基本结构如图 4－25 所示。

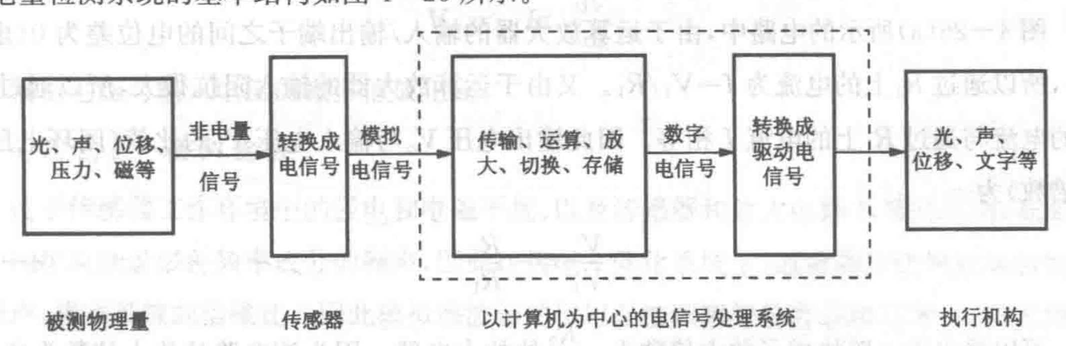
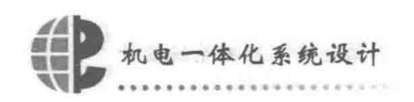


图 4－25 非电量检测系统的基本结构



4.3.1.2 **信号的处理**

传感器输出信号一般比较微弱，同时还夹杂着其他干扰信号，因此，在传输过程中，需对传感器输出信号进行放大、滤波、调制、解调、屏蔽隔离、A/D等各种形式的处理，同时还要考虑信号在传输过程中受噪声、温度、湿度、磁场等方面的干扰影响。

传感器信号处理主要考虑的问题包括：传感器输出的是模拟信号还是数字信号，是电压信号还是电流信号，输出信号幅值、阻抗、线性度、信噪比如何。

4.3.2 模拟信号的处理

4.3.2.1 **运算放大器**

一般来说，模拟式传感器输出的信号往往比较弱，而且其中还包含工频、静电和电磁耦合等共模干扰，为了提高检测精度，需要对这种信号进行放大处理。测量放大器目前已经广泛应用于机电一体化系统中。如图4－26所示，运算放大器通过电阻组合就可以实现放大和运算。

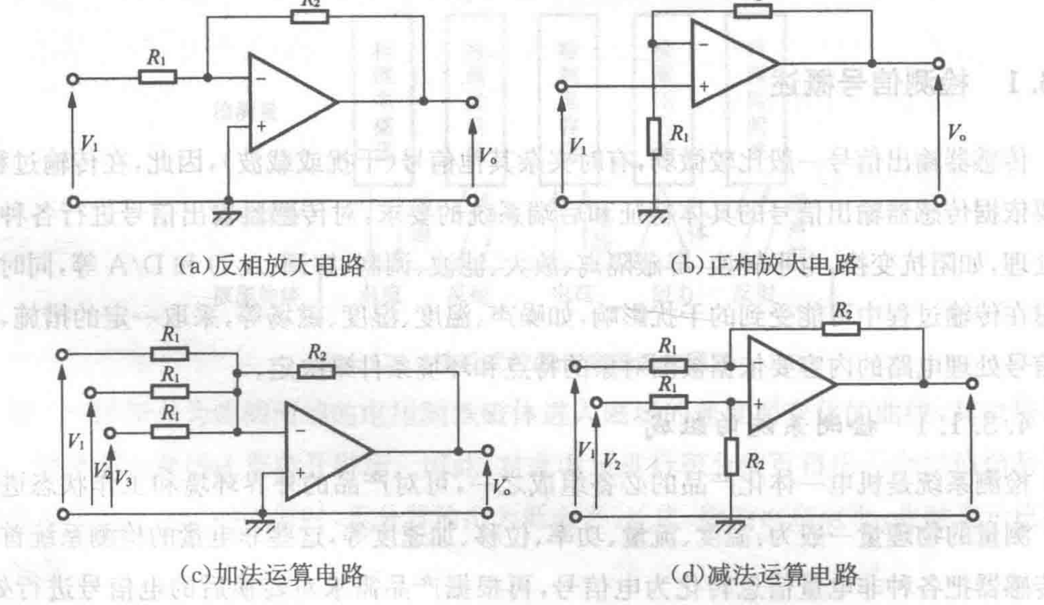


图4－26 运算放大器

图4－26(a)所示的电路中，由于运算放大器的输入/输出端子之间的电位差为0(虚短路)，所以通过R_1上的电流为$I=V_1/R_1$。又由于运算放大器的输入阻抗很大，所以通过R_2上的电流与通过R_1上的电流I相等。因此输出电压V_o与输入电压V_1的比值(闭环电压放大倍数)为

$$\frac{V_o}{V_1}=-\frac{R_2}{R_1} \tag{4-14}$$

可以看出该电路构成了放大倍数为$-\frac{R_2}{R_1}$的放大电路。因为该电路的放大倍数为负值，

故称为反相放大电路。

图 4—26(b)所示的电路 V_o 与 V_1 的比值为

$$\frac{V_o}{V_1}=1+\frac{R_2}{R_1} \tag{4—15}$$

其电压放大倍数为 $1+\frac{R_2}{R_1}$，故称为正相放大电路。

图 4—26(c)所示的电路的输出电压为

$$V_o=-\frac{R_2}{R_1}(V_1+V_2+V_3) \tag{4—16}$$

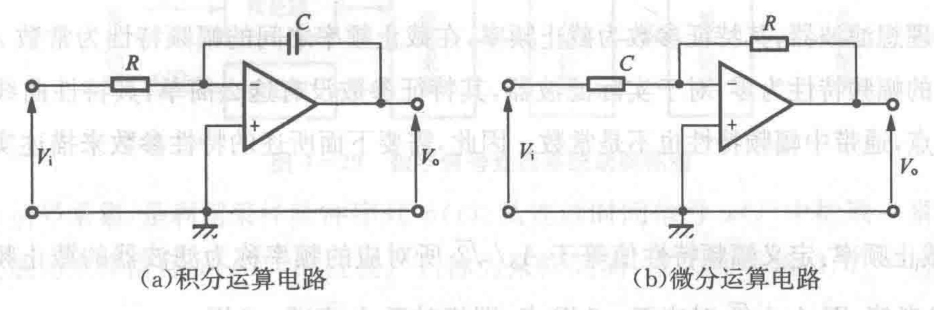
因为输出电压与输入电压之和成正比，所以称为加法运算电路。

图 4—26(d)所示电路的输出电压为

$$V_o=\frac{R_2}{R_1}(V_2-V_1) \tag{4—17}$$

因为输出电压与输入电压之差成正比，所以称为减法运算电路。

图 4—27 所示电路为由运算放大器、电阻和电容组成的微积分电路。



(a)积分运算电路　　(b)微分运算电路

图 4—27　采用运算放大器的微积分电路

图 4—27(a)所示的积分电路中，输出电压为

$$V_o=-\frac{1}{RC}\int V_i\,dt \tag{4—18}$$

输出电压与输入电压的积分值成正比。

图 4—27(b)所示的微分电路中输出电压为

$$V_o=-RC\frac{dV_i}{dt} \tag{4—19}$$

输出电压与输入电压的微分值成正比。

4.3.2.2　模拟滤波

由于传感器工作环境中的强电和电磁干扰，以及传感器和放大电路本身的影响，被测信号中往往夹杂着多种频率成分的噪声，因此在机电一体化系统中，通常需要采用滤波措施抑制噪声，提高系统的信噪比。因此模拟滤波器的作用是按频率把信号分离出来，提取有用的频率信号，使一定频率范围内的信号可以通过，而在此频率以外的信号不能通过。通常称可

以通过的频率范围为通带，不能通过的范围为阻带。

根据模拟滤波器按通过频率范围，可分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器四类。根据构成滤波器的电路性质，可分为有源滤波器和无源滤波器。

为了了解某一实际滤波器的特性，就需要通过一些参数指标来确定。图 4－28 所示为理想滤波器（虚线）和实际带通滤波器（实线）的幅频特性。

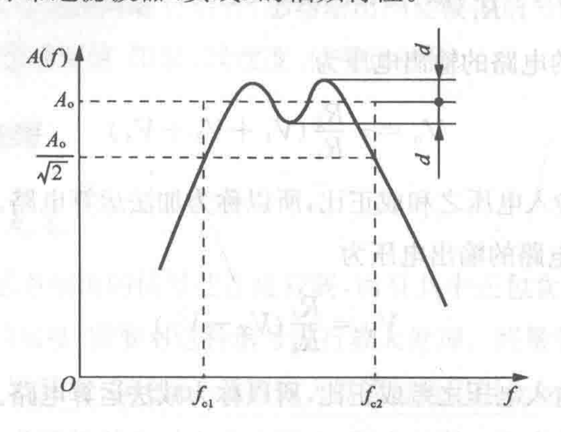


图 4－28　理想滤波器和实际带通滤波器的幅频特性

对于理想滤波器，其特征参数为截止频率，在截止频率之间的幅频特性为常数 A_o，截止频率以外的幅频特性为零；对于实际滤波器，其特征参数没有这么简单，其特性曲线没有明显的转折点，通带中幅频特性也不是常数。因此，需要下面所述的特性参数来描述实际滤波器的性能。

（1）截止频率：定义幅频特性值等于 $A_o/\sqrt{2}$ 所对应的频率称为滤波器的截止频率。若以 A_o 为参考值，则 $A_o/\sqrt{2}$ 对应于－3dB 点，即相对于 A_o 衰减－3dB。

（2）带宽 B：通频带的宽度称为带宽 B，这里为上、下两截止频率之间的频率范围，即 $B = f_{c2} - f_{c1}$（Hz）。带宽决定着滤波器分离信号中相邻频率成分的能力，即频率分辨力。

（3）品质因数 Q：Q 定义为带通或带阻滤波器的中心频率 f_o 与带宽 B 之比，即

$$Q = \frac{f_n}{B} = \frac{\sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}}}{B} \tag{4-20}$$

品质因数 Q 的大小反映了滤波器频率选择能力的高低。

（4）纹波幅度 d：实际滤波器在通频带内可能出现纹波变化，其波动幅度 d 与幅频特性的稳定值 A_o 相比越小越好，一般应远小于－3dB 点的衰减量，即 $d \ll A_o/\sqrt{2}$ 。

（5）倍频选择性：是指在上截止频率 f_{c2} 和 $2f_{c2}$ 之间，或在下截止频率 f_{c1} 与 $\frac{1}{2}f_{c1}$ 之间幅频特性的衰减值，即频率变化一倍频程时幅频特性的衰减量。

（6）滤波器因素 λ：滤波器选择性的另一种表示方法，是用滤波器幅频特性的－60dB 带宽与－3dB 带宽的比值表示，即

$$\lambda = \frac{B_{-60dB}}{B_{-3dB}} \tag{4-21}$$

理想滤波器$\lambda=1$，一般要求滤波器$1<\lambda<5$。如果带阻衰减量达不到-60dB，则以标明衰减量（如-40dB）的带宽与-3dB带宽之比来表示其选择性。

在实际工作中，根据滤波器参数和具体情况合理选用，以达到提取所需频率信号的目的。

4.3.3 数字信号的处理

4.3.3.1 A/D转换

把连续时间信号转换为与其相对应的数字信号的过程称为A/D（模拟－数字）转换过程，它们是数字信号处理的必要程序。经A/D转换后数字信号送入数字信号分析仪或数字计算机完成信号处理。

数字信号处理的基本步骤如图4－29所示。

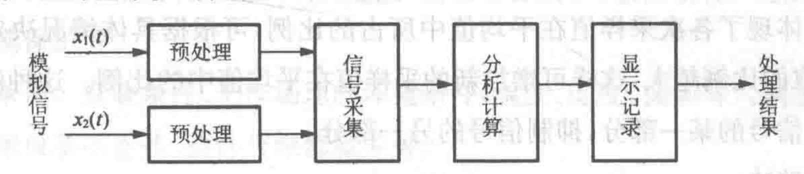


图4－29 数字信号处理系统功能框图

（1）信号采集：是利用采样脉冲序列$p(t)$，从连续时间信号$x(t)$中抽取一系列离散样值，使之成为采样信号$x(nT_s)$的过程。T_s称为采样间隔，或采样周期，$1/T_s=f_s$称为采样频率。

由于后续的量化过程需要一定的时间τ，对于随时间变化的模拟输入信号，要求瞬时采样值在时间τ内保持不变，这样才能保证转换的正确性和转换精度，这个过程就是采样保持。正是有了采样保持，实际上采样后的信号是阶梯形的连续函数。

（2）分析计算：把采样信号$x(nT_s)$经过舍入或截尾的方法变为只有有限个有效数字的数，这一过程称为量化。

（3）结果处理：将离散幅值经过量化以后变为二进制数字的过程。

信号$x(t)$经过上述变换以后，即变成了时间上离散、幅值上量化的数字信号。

4.3.3.2 数字滤波

检测信号被采入计算机后，尚需去除混杂在有用信号中的随机干扰信号，这时可采用数字滤波的方法予以削弱或消除。

数字滤波就是通过一定的计算程序对采样信号进行平滑加工，以减少干扰在有用信号中的比重，提高信号真实性，以保证计算机系统的可靠性。数字滤波可以对各种干扰信号，甚至极低频率的信号进行滤波。数字滤波由于稳定性高，滤波参数修改方便，滤波子程序可

以被各种控制回路调用，因此得到了广泛的应用。常用的数字滤波方法有以下几种。

1. 算术平均值法

平均值滤波法是对信号 Y 的 m 次测量值进行算术平均，作为时刻 n 的输出，即

$$Y(n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y(i) \tag{4—22}$$

n 值决定了信号平滑度和灵敏度。随着 n 的增大，平滑度提高，灵敏度降低。应视具体情况选取 n，以得到满意的滤波效果。为方便求平均值，n 值一般取 4、8、16 之类的 2 的整数幂，以使用移位来代替除法。

由上面的表达式可以看出，算术平均值滤波法对每次采样值给出相同的加权系数，即 $1/n$。实际上某些场合需要增加新采样值在平均值中的比重，可采用加权平均值滤波法，滤波公式为

$$\bar{y}=k_1y_1+k_2y_2+\cdots+k_ny_n \tag{4—23}$$

其中，k_1、k_2、…、k_n 为加权系数，且应满足 k_1、k_2、…、k_n 均大于 0，且它们的和为 1。

加权系数体现了各次采样值在平均值中所占的比例，可根据具体情况决定。一般采样次数越靠后，取的比例越大，这样可增加新的采样值在平均值中的比例。这种滤波方法可以根据需要突出信号的某一部分，抑制信号的另一部分。

2. 中值滤波法

所谓中值滤波是对某一参数连续采样 n 次（$n\geqslant3$，且为奇数），然后把 n 次的采样值从小到大或从大到小排队，再取中间值作为本次采样值。中值滤波对于去掉由于偶然因素引起的波动或采样器不稳定而造成的误差所引起的脉动干扰比较有效，对快速变化过程的参数（如流量），则不宜采用此方法。

中值滤波法和平均值滤波法结合起来使用，滤波效果会更好。即在每个采样周期，先用中值滤波法得到 n 个滤波值，再对这 n 个滤波值进行算术平均，得到可用的被测参数。

3. 限幅滤波法

由于大的随机干扰或采样器的不稳定，使得采样数据偏离实际值太远，为此可采用上下限限幅，即

当 $y(n)\geqslant y_n$ 时，取 $y(n)=y_n$（上限值）；

当 $y(n)\geqslant y_1$ 时，取 $y(n)=y_1$（下限值）；

当 $y_l<y(n)<y_n$ 时，取 $y(n)$。

而且采用限速（也称限制变化率），即

当 $|y(n)-y(n-1)|\leqslant\Delta y_0$ 时，取 $y(n)$；

当 $|y(n)-y(n-1)|\geqslant\Delta y_0$ 时，取 $y(n)=y(n-1)$。

其中，Δy_0 为两次相邻采样值之差的可能最大变化量。Δy_0 值的选取，取决于采样周期 T 以及被测参数 y 应有的正常变化率。因此，一定要按照实际情况来确定。

以上讨论了三种数字滤波方法，究竟选择哪一种应视具体情况而定。平均值滤波法适用于周期性干扰，中值滤波法和限幅滤波法适用于偶然的脉冲干扰。如果应用不恰当，不但达不到滤波效果，反而会降低控制品质。

4.4 传感器的正确选择和使用

4.4.1 传感器的选择

无论何种传感器，作为测量与控制系统的首要环节，通常都必须具有快速、准确、可靠且又经济的实现信息转换的基本要求。因此，选择传感器应从以下几个方面考虑。

(1)测试要求和条件。测量目的、被测物理量选择、测量范围、输入信号最大值和频带宽度、测量精度要求、测量所需时间要求等。

(2)传感器特性。精度、稳定性、响应速度、输出量性质、对被测物体产生的负载效应、校正周期、输入端保护等。

(3)使用条件。安装条件、工作场地的环境条件(温度、湿度、振动等)、测量时间、所需功率容量、与其他设备的连接、备件与维修服务等。

以上是选择传感器的主要考虑出发点。总之，为了提高测量精度，应从传感器的使用目的、使用环境、被测对象状况、精度要求和信号处理等条件综合考虑，注意传感器的工作范围要足够大；与测量或控制系统相匹配性好，转换灵敏度高和线性程度好；响应快，工作可靠性好；精度适当，且稳定性好；适用性和适应性强，即动作能量小，对被测量状态影响小；内部噪声小而又不易受外界干扰的影响，使用安全；使用经济，即成本低、寿命长，且易于使用、维修和校准。

4.4.2 传感器的正确使用

传感器的正确使用是指传感器的输出特性进行线性化处理和补偿，传感器的标定，抗干扰措施。

4.4.2.1 线性化处理与补偿

在机电一体化测控系统中，特别是需对被测参量进行显示时，总是希望传感器及检测电路的输出和输入特性呈线性关系，使测量对象在整个刻度范围内灵敏度一致，以便于读数及对系统进行分析处理。但是大多数传感器具有不同程度的非线性特性，这使较大范围的动态检测存在着很大的误差。在使用模拟电路组成检测回路时，为了进行非线性补偿，通常采用与传感器输入/输出特性相反特性的元件，通过硬件进行线性化处理。另外，在含有微型计算机的测量系统中，这种非线性补偿可以用软件来完成，其补偿过程较简单，精确度也很

高，又减少了硬件电路的复杂性。

当输出量中包含有被测物理量之外的因素时，为了克服这些因素的影响需要采取相应的措施加以补偿。如外界环境温度变化，将会使测量系统产生附加误差，影响测量精度，因此有必要对温度进行补偿。

4.4.2.2 传感器的标定

传感器的标定，就是利用精度高一级的标准量具对传感器进行定度的过程，从而确定其输出量和输入量之间的对应关系，同时也确定不同使用条件下的误差关系。传感器使用前要进行标定，使用一段时间后还要定期进行校正，检查精度性能是否满足原设计指标。

4.4.2.3 抗干扰措施

传感器大多要在现场工作，而现场的条件往往是不可预料的，有时是极其恶劣的。各种外界因素要影响传感器的精度和性能，所以在检测系统中，抗干扰是非常重要的，尤其是在微弱输入信号的系统中。常采用的抗干扰措施有屏蔽、接地、隔离和滤波等。

1.屏蔽

屏蔽就是用低电阻材料或磁性材料把元件、传输导线、电路及组合件包围起来，以隔离内外电磁或电场的相互干扰。屏蔽可分为三种，即电场屏蔽、磁场屏蔽及电磁屏蔽。电场屏蔽主要用来防止元器件或电路间因分布电容耦合形成的干扰。磁场屏蔽主要用来消除元器件或电路间因磁场寄生耦合产生的干扰，磁场屏蔽的材料一般都选用高磁导率的磁性材料。电磁屏蔽主要用来防止高频电磁场的干扰，电磁屏蔽的材料应选用导电率较高的材料，如铜、银等，利用电磁场在屏蔽金属内部产生涡流而起屏蔽作用。电磁屏蔽的屏蔽体可以不接地，但一般为防止分布电容的影响，可以使电磁屏蔽的屏蔽体接地，起到兼有电场屏蔽的作用。电场屏蔽体必须可靠接地。

2.接地

电路或传感器中的地指的是一个等电位点，它是电路或传感器的基准电位点，与基准电位点相连接，就是接地。传感器或电路接地，是为了清除电流流经公共地线阻抗时产生噪声电压，也可以避免受磁场或地电位差的影响。把接地和屏蔽正确结合起来使用，就可抑制大部分的噪声。

3.隔离

当电路信号在两端接地时，容易形成地环路电流，引起噪声干扰。这时，常采用隔离的方法，把电路的两端从电路上隔开。隔离的方法主要采用变压器隔离和光电耦合器隔离。

在两个电路之间加入隔离变压器可以切断地环路，实现前后电路的隔离，变压器隔离只适用于交流电路。在直流或超低频测量系统中，常采用光电耦合的方法实现电路的隔离。

4.滤波

虽然采取了上述的一些抗干扰措施，但仍会有一些噪声信号混杂在检测信号中，因此检

测电路中还常设置滤波电路，对由外界干扰引入的噪声信号加以滤除。

滤波电路或滤波器是一种能使某一种频率顺利通过而另一种频率受到较大衰减的装置。因传感器的输出信号大多数是缓慢变化的，因而对传感器输出信号的滤波常采用有源低通滤波器，它只允许低频信号通过而不能通过高频信号。有些传感器需用高通滤波器。除此以外，有时还要使用带通滤波器和带阻滤波器。总之，由于不同检测系统的不同需要，应选用不同的滤波电路。

第5章　伺服系统设计

5.1　概　述

5.1.1　伺服系统的基本概念

伺服系统，也称随动系统，是一种能够跟踪输入的指令信号进行动作，从而获得精确的位置、速度或力输出的自动控制系统。

大多数伺服系统具有检测反馈回路，因而伺服系统是一种反馈控制系统。按照反馈控制理论，伺服系统需不断检测在各种扰动作用下被控对象输出量的变化，与指令值进行比较，并用两者的偏差值对系统进行自动调节，以消除偏差，使被控对象输出量始终跟踪输入的指令值。

伺服系统是根据输入的指令值与输出的物理量之间的偏差进行动作控制的。因此伺服系统的工作过程是一个偏差不断产生，又不断消除的动态过渡过程。

伺服控制的实例随处可见，如工人操作机床进行加工时，必须用眼睛始终观察加工过程的进行情况，通过大脑对来自眼睛的反馈信息进行处理，决定下一步如何操作，然后通过手摇动手轮，驱动工作台上的工件或刀具来执行大脑的决策，消除加工过程中出现的偏差，最终加工出符合要求的工件。在这个例子中，检测、反馈与控制等功能是通过人来实现的，而在伺服系统中，这些功能都要通过传感器、控制及信息处理装置等来加以实现。如数控机床的伺服系统中，位置检测传感器、数控装置和伺服电动机分别取代了人的眼睛、大脑和手的功能。

许多机电一体化产品(如数控机床、工业机器人等)，需要对输出量进行跟踪控制，因而伺服系统是机电一体化产品的一个重要组成部分，而且往往是实现某些产品目的功能的主体。伺服系统中离不开机械技术和电子技术的综合运用，其功能是通过机电结合才得以实现的，因此，伺服系统本身就是一个典型的机电一体化系统。

5.1.2　伺服系统的基本结构形式

从自动控制理论的角度来分析，无论多么复杂的伺服系统，都是由一些功能元件组成

的。图 5—1 是由各功能元件组成的伺服系统基本结构方框图，下面对各功能元件的作用加以说明。

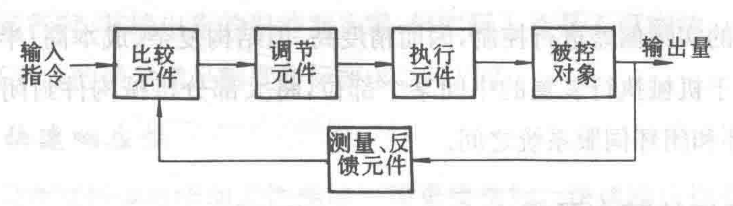


图 5—1　伺服系统基本结构方框图

(1)比较元件。是将输入的指令信号与系统的反馈信号进行比较，以获得控制系统动作的偏差信号的环节，通常可通过电子电路或计算机软件来实现。

(2)调节元件。又称控制器，是伺服系统的一个重要组成部分，其作用是对比较元件输出的偏差信号进行变换、放大，以控制执行元件按要求动作。调节元件的质量对伺服系统的性能有着重要的影响，其功能一般由软件算法加硬件电路实现，或单独由硬件电路实现。

(3)执行元件。其作用是在控制信号的作用下，将输入的各种形式的能量转换成机械能，驱动被控对象工作。机电一体化产品中多采用伺服电动机作为执行元件。

(4)被控对象。是伺服系统中被控制的设备或装置，是直接实现目的功能或主功能的主体，其行为质量反映着整个伺服系统的性能。被控对象一般都是机械装置，包括传动机构和执行机构。

(5)测量反馈元件。是指传感器及其信号检测装置，用于实时检测被控对象的输出量并将其反馈到比较元件。

伺服系统还可被看作是由电气控制装置和机械执行装置两大部分组成的，如图 5—2 所示。在控制信号传递路线上，电气控制装置与机械执行装置以执行元件作为接口；在信号反馈路线上，两者以传感器作为接口。

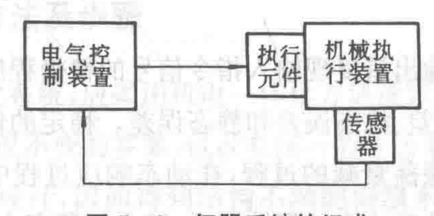


图 5—2　伺服系统的组成

5.1.3　伺服系统的基本类型

伺服系统的种类很多，采用不同的分类方法，可得到不同类型的伺服系统。

按被控量的不同可将伺服系统分成位置、速度、力等伺服系统，其中最常见的是位置伺服系统，如数控机床的伺服进给系统等。

按所采用的执行元件的不同可将伺服系统分成电气、液压、气动等伺服系统。电气伺服系统采用伺服电动机作为执行元件，在机电一体化产品中应用比较广泛。

按控制方式的不同可将伺服系统分成开环、闭环、半闭环等伺服系统。开环伺服系统中无检测反馈元件,结构简单,但精度低;闭环伺服系统直接对输出量进行检测和反馈,并根据输出量对输入量的实际偏差进行控制,因而精度高,但结构复杂、成本高;半闭环伺服系统的检测反馈元件位于机械执行装置的中间某个部位,将大部分机械构件封闭在反馈控制环之外,性能介于开环和闭环伺服系统之间。

5.1.4 伺服系统的基本要求

5.1.4.1 稳定性

伺服系统的稳定性是指当作用在系统上的扰动信号消失后,系统能够恢复到原来的稳定状态下运行,或者在输入的指令信号作用下,系统能够达到新的稳定运行状态的能力。稳定的伺服系统在受到外界干扰或输入指令作用时,其输出响应的过渡过程随着时间的增加而衰减,并最终达到与期望值一致。不稳定的伺服系统,其输出响应的过渡过程或者随时间的增长而增长,或者表现为等幅振荡。因此对伺服系统的稳定性要求是一项最基本的要求,也是伺服系统能够正常运行的最基本条件。

伺服系统的稳定性是系统本身的一种特性,取决于系统的结构及组成元件的参数(如惯性、刚度、阻尼、增益等),与外界作用信号(包括指令信号和扰动信号)的性质或形式无关。一个伺服系统是否稳定,可根据系统的传递函数,采用自动控制理论所提供的各种方法来判别。

对于位置伺服系统,当运动速度很低时,往往会出现一种由摩擦特性所引起的、被称为“爬行”的现象,这也是伺服系统不稳定的一种表现。爬行会严重影响伺服系统的定位精度和位置跟踪精度。

5.1.4.2 精度

伺服系统的精度是指其输出量复现输入指令信号的精确程度。伺服系统工作过程中通常存在着三种误差,即动态误差、稳态误差和静态误差。稳定的伺服系统对变化的输入信号的动态响应过程往往是一个振荡衰减的过程,在动态响应过程中输出量与输入量之间的偏差称为系统的动态误差。在动态响应过程结束后,即在振荡完全衰减掉之后,输出量对输入量的偏差可能会继续存在,这个偏差称为系统的稳态误差。系统的静态误差则是指由系统组成元件本身的误差及干扰信号所引起的系统输出量对输入量的偏差。

影响伺服系统精度的因素很多,就系统组成元件本身的误差来讲,有传感器的灵敏度和精度、伺服放大器的零点漂移和死区误差、机械装置中的反向间隙和传动误差、各元器件的非线性因素等。此外,伺服系统本身的结构形式和输入指令信号的形式对伺服系统精度都有重要影响。从构成原理上讲,有些系统无论采用多么精密的元器件,也总是存在稳态误差的,这类系统称为有差系统,而有些系统却是无差系统。系统的稳态误差还与输入指令信号

的形式有关，当输入信号形式不同时，有时存在误差，有时却误差为零。

精度是对伺服系统的一项重要的性能要求。人们主观上往往总是希望所设计的伺服系统在任何情况下运行时，其输出量的误差都为零，但实际上这是不可能的。在实际设计伺服系统时，只要保证系统的误差满足精度指标要求就可以了。

5.1.4.3 **快速响应性**

快速响应性是衡量伺服系统动态性能的一项重要指标。快速响应性有两方面含义：一是指动态响应过程中，输出量跟随输入指令信号变化的迅速程度；二是指动态响应过程结束的迅速程度。

伺服系统对输入指令信号的响应速度常由系统的上升时间（输出响应从零上升到稳态值所需要的时间）来表征，它主要取决于系统的阻尼比。阻尼比小则响应快，但阻尼比太小会导致最大超调量（系统输出响应的最大值与稳态值之间的偏差）增大和调整时间（系统的输出响应达到并保持在其稳态值的一个允许的误差范围内所需要的时间）加长，使系统相对稳定性降低。伺服系统动态响应过程结束的迅速程度用系统的调整时间来描述，并取决于系统的阻尼比和无阻尼固有频率。当阻尼比一定时，提高固有频率值可以缩短响应过程的持续时间。

伺服系统的快速响应性、稳定性和精度三项基本性能要求是相互关联的，在进行伺服系统设计时，必须首先满足稳定性要求，然后在满足精度要求的前提下尽量提高系统的快速响应性。

上述三项性能要求是对一般伺服系统的基本性能要求，除此之外，对机电一体化产品中常用的位置伺服系统，还有调速范围、负载能力、可靠性、体积、质量以及成本等方面的要求，这些要求都应在设计时给予综合考虑。

5.1.5 伺服系统设计方法及步骤

伺服系统是机电一体化系统，应采用机电一体化方法进行设计。

伺服系统设计，没有一成不变的答案，也没有统一的方法来得到答案。不同要求的伺服系统，可采用不同的方法来设计，因而得到结构不同的伺服系统。即使同样要求的伺服系统，不同的设计者也可能采用不同的设计方法，因而得到不同的设计方案。

伺服系统结构上的复杂性，决定了其设计过程的复杂性。实际伺服系统的设计是很难一次成功的，往往都要经过多次反复修改和调试才能获得满意的结果。下面仅对伺服系统设计的一般步骤和方法做简单介绍。

5.1.5.1 **设计要求分析，系统方案设计**

首先对伺服系统的设计要求进行分析，明确其应用场合和目的、基本性能指标及其他性能指标，然后根据现有技术条件拟订几种技术方案，经过评价、对比，选定一种比较合理的

方案。

方案设计应包括下述一些内容：控制方式选择；执行元件选择；传感器及其检测装置选择；机械传动及执行机构选择等。方案设计是系统设计的第一步，各构成环节的选择只是初步的，还要在详细设计阶段进一步修改确定。

5.1.5.2　系统性能分析

方案设计出来后，尽管各具体结构参数还没有确定，也应先根据基本结构形式对其基本性能进行初步分析。

首先画出系统方框图，列出系统近似传递函数，并对传递函数及方框图进行化简（一般应简化成二阶以下系统），然后在此基础上对系统稳定性、精度及快速响应性进行初步分析，其中最主要的是稳定性分析，如不能满足设计要求，应考虑修改方案或增加校正环节。

5.1.5.3　执行元件及传感器的选择

方案设计中只是对执行元件及传感器进行了初步选型，这一步应根据具体速度、负载及精度要求来具体确定执行元件及传感器的参数和型号。

5.1.5.4　机械系统设计

机械系统设计包括机械传动机构及执行机构的具体结构及参数的设计，设计中应注意消除各种传动间隙，尽量提高系统刚度、减小惯量及摩擦，尤其在设计执行机构的导轨时要防止会产生“爬行”现象。

5.1.5.5　控制系统设计

控制系统设计包括信号处理及放大电路、校正装置、伺服电动机驱动电路等的详细设计，如果采用计算机数字控制，还应包括接口电路及控制器算法软件的设计。控制系统设计中应注意各环节参数的选择及与机械系统参数的匹配，以使系统具有足够的稳定裕度和快速响应性，并满足精度要求。

5.1.5.6　系统性能复查

所有结构参数确定之后，可重新列出系统精确的传递函数，但实际的伺服系统一般都是高阶系统，因而还应进行适当化简，才可进行性能复查。经过复查如发现性能不够理想，则可调整控制系统的参数或修改算法，甚至重新设计，直到满意为止。

5.1.5.7　系统测试实验

上述设计与分析都还处于理论阶段，实际系统的性能，还需通过测试实验来确定。测试实验可在模型实验系统上进行，也可在试制的样机上进行。通过测试实验，往往还会发现一些问题，必须采取措施加以解决。

5.1.5.8　系统设计定案

经过上述 7 个步骤及其中多次反复而得到满意的结果后，可以将设计方案确定下来，然

后整理设计图样及设计计算说明书等技术文件，准备投入正式生产。

5.2　伺服系统中执行器的选择

执行器的种类很多，各种类型元件的特性、成本、结构及安装方式都有很大区别。选择何种执行元件，应根据控制方法、成本、工作环境等要求综合考虑。

5.2.1　执行器形式的选择

执行器驱动的执行机构常见的输出主要是直线运动和旋转运动。

5.2.1.1　直线运动机构执行器的选择

实现直线运动的执行器主要有直线步进电动机、直线电动机、液压缸、气缸。它们都可以直接驱动负载，产生直线运动。直接驱动的优点是：负载与驱动元件直接连接，执行机构比较简单。缺点是直线执行元件种类相对较少，尺寸较大。液压缸和气缸结构比较简单，但需要控制阀、动力源等辅助元件，占地空间较大；液压源噪声较大，也存在环境污染等问题。直线步进电动机和直线电动机体积比较大，价格也比较昂贵。

实现直线驱动的另一种方法是采用转动执行器，然后通过中间机构实现直线运动。常见的有：采用电动机丝杠螺母机构，电动机齿轮齿条机构，电动机连杆机构等。这些实现直线运动的方式的主要特点是通过一个中间传动机构将电动机的运动传递给负载。通常中间机构可以实现大的传动比，具有较小的折算惯量，控制性能好。

用电动机实现直线驱动时，采用转动电动机比采用直线电动机直接驱动结构紧凑，控制性能好，成本低。对于应用气源方便，对控制精度要求不高，采用开关控制就能满足要求的各类包装机械等，使用气缸驱动比较合理。对于工作环境恶劣，有防爆、防水要求的情况，如化工领域中的应用等，多使用液压缸实现直线运动。

5.2.1.2　旋转运动机构执行器的选择

实现旋转运动可采用电动机、气压马达或液压马达等执行器。使用气压或液压马达驱动时，一般不使用中间传动机构，将马达轴与负载直接耦合，传动机构简单，结构紧凑。使用电动机驱动时，一般使用较大传动比的减速器，以获得合适的运动速度和负载能力。在相同的负载情况下，液压马达比电动机齿轮机构尺寸小、负载刚度大、快速性好。使用液压马达驱动时，需要使用电液伺服阀和专用的液压动力源，对环境有污染，成本也比较高。使用液压缸通过杠杆机构也可以实现转动。液压缸较液压马达结构简单，成本低，在实际中应用也很普遍。表 5－1 列出了用电动机、液压缸及液压马达、气缸实现转动驱动的特点。

表 5－1　常用执行器的主要特点

特点	直流伺服电动机	交流伺服电动机	步进电动机	液压缸及液压马达	气缸
结构形式	直线式、转动式	转动式	直线式、转动式	直线式、转动式	直线式、转动式
工作介质	—	—	—	液压油、水	压缩空气
使用环境	一般工业环境	一般工业环境	一般工业环境	恶劣环境	一般工业环境
功率密度/单位体积	中等	中等	较小	最大	小
输出力矩、输出功率	中等、几百瓦	较大、几千瓦	较小、几十瓦	较大	较小
控制方式	闭环调速控制，闭环位置控制	闭环调速控制，闭环位置控制	开环位置、速度控制	闭环速度、闭环位置控制	开关控制、闭环速度控制、位置控制
与执行机构的匹配方式	直线电动机直接驱动，转动电动机加减速器驱动	直接驱动或加减速器	直接驱动小功率负载，或加减速器驱动	直接驱动	直接驱动
负载特性	直接驱动时，负载刚度较差，加减速器后可获得较好的负载特性	较强的带负载能力	带负载能力较差，启动速度受负载惯量大小的限制	带负载能力强，负载刚度大	带负载能力强，负载刚度差
使用场合	中、小功率伺服驱动系统，如工业机器人、数控机床等	大、中功率伺服驱动系统，如数控机床	小功率驱动系统、自动化仪表驱动	大功率驱动系统，恶劣环境中的驱动系统，如水下机器人	小功率驱动系统，如应用在各种装配生产线
成本	结构工艺复杂，专用功率电源，成本较高	专用交流调速电源，成本较高	开环控制，成本较低	需专用伺服元件、液压站，成本较高	采用通用工业气源，成本较低

5.2.2　电动机功率的确定

5.2.2.1　连续恒定负载运行的电动机功率计算

当电动机在恒负载运行期间温升达到稳定值时，便将其作为连续负载考虑。

电动机功率的计算公式为

$$P=\frac{Tn}{9550} \tag{5-1}$$

式中，P——电动机的计算功率，单位为kW；

T——折算到电动机轴上的负载转矩，单位为N·m；

n——电动机的额定转速，单位为r/min。

选用的电动机额定功率必须稍大于或等于计算功率P的值。当电动机的使用环境温度与标准的40℃相差较大时，电动机的额定功率要计入温度修正系数，例如，当使用环境为45℃时，电动机的额定功率约下降5%，50℃时约下降12.5%。

5.2.2.2 连续周期性变化负载的电动机功率计算

连续周期性变化负载的电动机功率计算常用等效转矩法，其步骤如下。

(1)计算并绘制折算到电动机轴上的负载转矩，即

$$T=f(t)$$

(2)计算变化负载的等效转矩，即

$$T=\sqrt{\frac{T_1^2t_1+T_2^2t_2+\cdots}{t_1+t_2+\cdots}}=\sqrt{\frac{1}{T_T}\sum_{i=1}^{n}T_i^2t_i} \tag{5-2}$$

式中，T——等效负载转矩，单位为N·m；

$T_1,T_2,\cdots,T_i$——各段负载转矩，单位为N·m；

$t_1,t_2,\cdots,t_i$——各段负载的持续时间，单位为s；

$T_T=\sum\limits_{i=1}^{n}t_i$——负载变化的周期，单位为s。

首先按负载T初选电动机的型号，然后在原转矩图叠加加速阶段的动态转矩$\frac{GD^2}{375}\cdot\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}$，这样即可得到实际的转矩图，再按上述计算公式求得电动机的等效转矩。

(3)电动机转矩的校验，当计算的转矩$T\leqslant T_N$(所选电动机的额定转矩)时，即认为所选电动机型号可用。

该方法适宜于电动机转矩与电流成正比的使用场合，不适合用在运行周期内频繁启动/制动的笼型异步电动机。

5.2.2.3 短时工作制的电动机功率计算

短时工作制是指电动机的运行时间短，停止时间却很长，电动机的温升达不到稳定值。短时工作制的电动机在选择时，首先要校验它的启动转矩是否足够，应把电动机的过载能力考虑在内。

负载所需的启动转矩为

$$T_s\geqslant\frac{T_{max}K_s}{K_V^2} \tag{5-3}$$

式中，T_s——负载所需的启动转矩，单位为N·m；

T_{max}——启动过程中的最大负载转矩，单位为N·m；

K_s——加速所需的动态转矩系数，一般取 1.15～1.25；

K_V——电压波动系数。

如果选用异步电动机，其额定功率应满足以下条件：

$$P_R \geqslant \frac{P_{max}}{0.75\lambda} \tag{5-4}$$

式中，P_R——电动机的额定功率，单位为 kW；

P_{max}——短时工作的最大负载功率，单位为 kW；

λ——电动机的转矩过载倍数。

5.2.2.4 断续工作制电动机的功率计算

断续工作制的周期规定不超过 10min，其中包括电动机的启动、运行、制动、停止等几个阶段。普通的电动机一般难以胜任如此频繁的操作，必须选择一类专用电动机。断续工作制的电动机以负载持续率 FC(%)来标定它的额定功率，其 FC 值分别为 15%、25%、40%、60%四种。同一电动机在不同的 FC 值下工作，其额定功率是不同的。FC 值越小，则额定功率越大。该类电动机的特点是机械强度高，启动和过载能力很强，适应于频繁工作的运行，但它的机械特性较软，效率稍低。

对于断续工作制的电动机功率的计算，可按运行期间的负载，先计算出所需的功率，其方法如同连续工作制的电动机功率计算一样，然后在产品样本上按实际FC 值找到所需电动机型号。



第 6 章　控制系统设计

机电一体化系统中的计算机占有相当重要的地位，它代表着系统的先进性和智能性。计算机以其运算速度快、可靠性高、价格便宜，被广泛地应用于工业、农业、国防以及日常生活的各个领域。计算机用于机电一体化系统使该领域近年来发展非常迅速。例如，卫星跟踪天线的控制、电气传动装置的控制、数控机床、工业机器人的运动、力控系统、飞机、大型油轮的自动驾驶仪等。如今，走进现代化生产车间，你将会看到许多常规的控制仪表和调节器已经被计算机所取代，计算机时刻不断地监控整个生产过程，对生产中的各种参数，如温度、压力、流量、液位、转速和成分等进行采样，迅速进行复杂的数据处理、打印和显示生产工艺过程的统计数字和参数，并发出各种控制命令。

6.1　概　述

6.1.1　计算机控制系统的组成

将模拟式自动控制系统中的控制器的功能用计算机来实现，就组成了一个典型的计算机控制系统，如图 6－1 所示。因此，简单地说，计算机控制系统就是采用计算机来实现的工业自动控制系统。

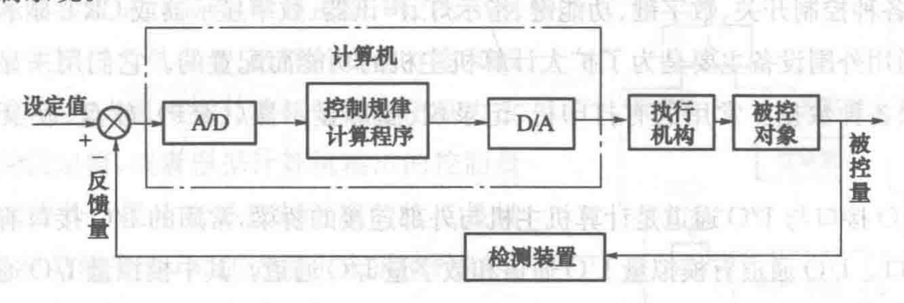


图 6－1　计算机控制系统基本框图

在控制系统中引入计算机，可以充分利用计算机的运算、逻辑判断和记忆等功能完成多种控制任务。在系统中，由于计算机只能处理数字信号，因而给定值和反馈量要先经过 A/D 转换器将其转换为数字量，才能输入计算机。当计算机接收了给定量和反馈量后，依照偏差值，按某种控制规律进行运算（如 PID 运算），计算结果（数字信号）再经过 D/A 转换器，将数字信号转换成模拟控制信号输出到执行机构，便完成了对系统的控制作用。

典型的机电一体化控制系统结构如图6—2所示，它可分为硬件和软件两大部分。硬件是指计算机本身及其外围设备，一般包括中央处理器、内存储器、磁盘驱动器、各种接口电路、以A/D转换和D/A转换为核心的模拟量I/O通道、数字量I/O通道以及各种显示、记录设备、运行操作台等。

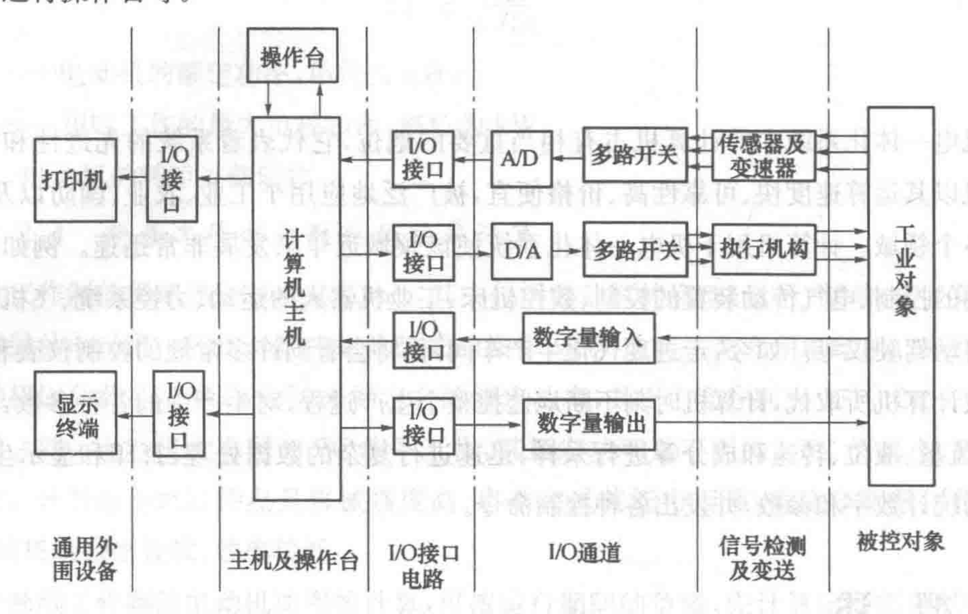


图6—2 典型计算机控制系统的组成框图

(1)由中央处理器、时钟电路、内存储器构成的计算机主机是组成计算机控制系统的核心部件，主要进行数据采集、数据处理、逻辑判断、控制量计算、越限报警等，通过接口电路向系统发出各种控制命令，指挥全系统有条不紊地协调工作。

(2)操作台是人—机对话的联系纽带，操作人员可通过操作台向计算机输入和修改控制参数，发出各种操作命令；计算机可向操作人员显示系统运行状况，发出报警信号。操作台一般包括各种控制开关、数字键、功能键、指示灯、声讯器、数字显示器或CRT显示器等。

(3)通用外围设备主要是为了扩大计算机主机的功能而配置的。它们用来显示、存储、打印、记录各种数据。常用的有打印机、记录仪、图形显示器(CRT)、软盘、硬盘及外存储器等。

(4)I/O接口与I/O通道是计算机主机与外部连接的桥梁，常用的I/O接口有并行接口和串行接口。I/O通道有模拟量I/O通道和数字量I/O通道。其中模拟量I/O通道的作用是，一方面将经由传感器得到的工业对象的生产过程参数变换成二进制代码传送给计算机；另一方面将计算机输出的数字控制量变换为控制操作执行机构的模拟信号，以实现对生产过程的控制。数字量通道的作用是，除完成编码数字输入、输出外，还可将各种继电器、限位开关等的状态通过输入接口传送给计算机，或将计算机发出的开关动作逻辑信号经由输出接口传送给生产机械中的各个电子开关或电磁开关。

(5)传感器的主要功能是将被检测的非电学量参数转变成电学量，如热电偶把温度变成

电压信号,压力传感器把压力变成电信号等。变送器的作用是将传感器得到的电信号转变成适用于计算机接口使用的标准的电信号(如直流 0~10mA)。

此外,为了控制生产过程,还需有执行机构。常用的执行机构有各种电动、液动、气动开关,电液伺服阀,交、直流电机,步进电机等。

软件是指计算机控制系统中具有各种功能的计算机程序的总和,如完成操作、监控、管理、控制、计算和自诊断等功能的程序。整个系统在软件指挥下协调工作。从功能区分,软件可分为系统软件和应用软件。

系统软件是由计算机的制造厂商提供的,用来管理计算机本身的资源和方便用户使用计算机的软件。常用的有操作系统、开发系统等,它们一般不需用户自行设计编程,只需掌握使用方法或根据实际需要加以适当改造即可。

应用软件是用户根据要解决的控制问题而编写的各种程序,如各种数据采集、滤波程序、控制量计算程序、生产过程监控程序等。

在计算机控制系统中,软件和硬件不是独立存在的,在设计时必须注意两者相互间的有机配合和协调,只有这样才能研制出满足生产要求的高质量的控制系统。

6.1.2 计算机在控制中的应用方式

根据计算机在控制中的应用方式,可以把计算机控制系统划分为四类,即操作指导控制系统、直接数字控制系统、监督计算机控制系统和分级计算机控制系统。

6.1.2.1 操作指导控制系统

如图 6—3 所示,在操作指导控制系统中,计算机的输出不直接用来控制生产对象。计算机只是对生产过程的参数进行采集,然后根据一定的控制算法计算出供操作人员参考、选择的操作方案和最佳设定值等,操作人员根据计算机的输出信息去改变调节器的设定值,或者根据计算机输出的控制量执行相应的操作。操作指导控制系统的优点是结构简单,控制灵活安全,特别适用于未摸清控制规律的系统,常常被用于计算机控制系统研制的初级阶段,或用于试验新的数学模型和调试新的控制程序等。由于最终需人工操作,故不适用于快速过程的控制。

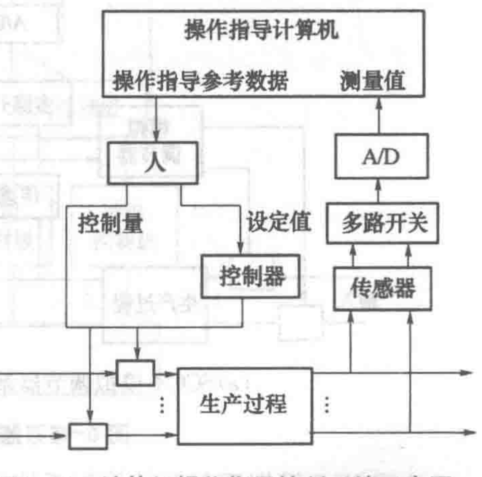


图 6—3 计算机操作指导控制系统示意图

6.1.2.2 直接数字控制系统

直接数字控制(Direct Digital Control,DDC)系统是计算机用于工业过程控制最普遍的一种方式,其结构如图 6-4 所示。计算机通过输入通道对一个或多个物理量进行巡回检

测，并根据规定的控制规律进行运算，然后发出控制信号，通过输出通道直接控制调节阀等执行机构。

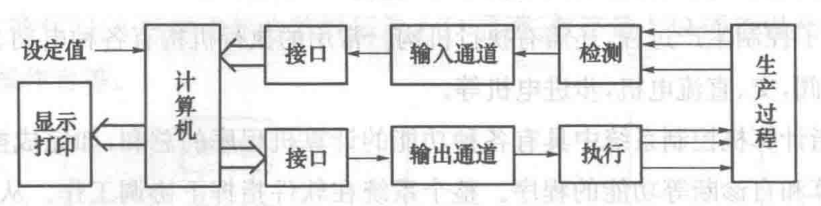


图 6－4　直接数字控制系统

在 DDC 系统中的计算机参加闭环控制过程，它不仅能完全取代模拟调节器，实现多回路的 PID（比例、积分、微分）调节，而且不需改变硬件，只需通过改变程序就能实现多种较复杂的控制规律，如串级控制、前馈控制、非线性控制、自适应控制、最优控制等。

6.1.2.3　监督计算机控制系统

在监督计算机控制（Supervisory Computer Control，SCC）系统中计算机根据工艺参数和过程参量检测值，按照所设计的控制算法进行计算，计算出最佳设定值直接传送给常规模拟调节器或者 DDC 计算机，最后由模拟调节器或 DDC 计算机控制生产过程。SCC 系统有两种类型，一种是 SCC＋模拟调节器，另一种是 SCC＋DDC 控制系统。监督计算机控制系统构成示意图如图 6－5 所示。

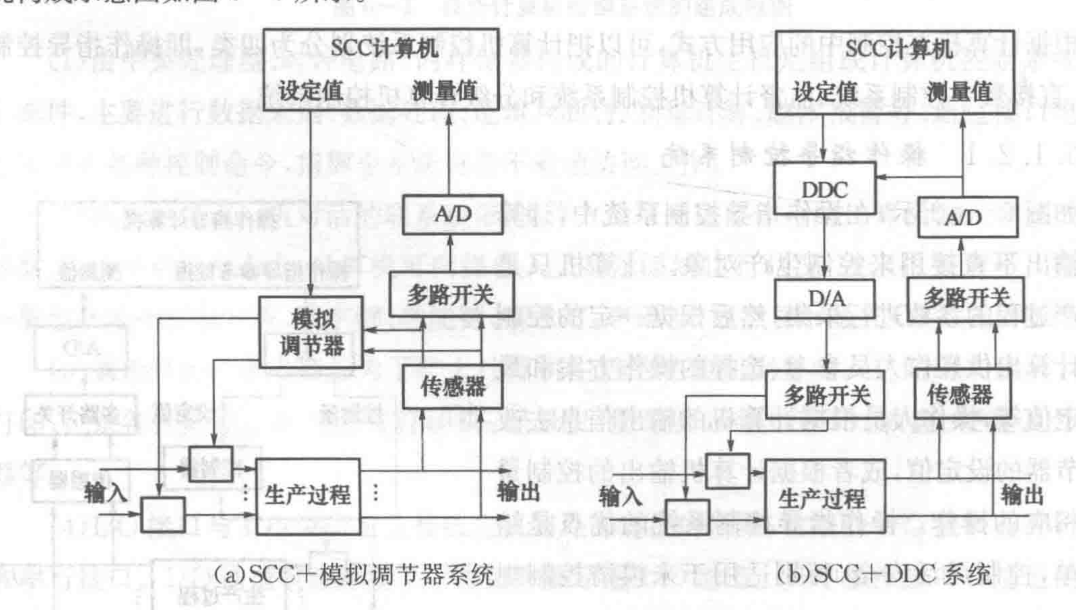


图 6－5　监督计算机控制系统构成示意图

1. SCC＋模拟调节器的控制系统

这种类型的系统中，计算机对各过程参量进行巡回检测，并按一定的数学模型对生产工况进行分析、计算后得出被控对象各参数的最优设定值送给调节器，使工况保持在最优状态。当 SCC 计算机发生故障时，可由模拟调节器独立执行控制任务。

2. SCC＋DDC 的控制系统

这是一种二级控制系统，SCC 可采用较高档的计算机，它与 DDC 之间通过接口进行信息交换。SCC 计算机完成工段、车间等高一级的最优化分析和计算，然后给出最优设定值，送给 DDC 计算机执行控制。

通常在 SCC 系统中，选用具有较强计算能力的计算机，其主要任务是输入采样和计算设定值。由于它不参与频繁的输出控制，可有时间进行具有复杂规律的控制算式的计算。因此，SCC 能进行最优控制、自适应控制等，并能完成某些管理工作。SCC 系统的优点是不仅可进行复杂控制规律的控制，而且其工作可靠性较高，当 SCC 出现故障时，下级仍可继续执行控制任务。

6.1.2.4　分级计算机控制系统

生产过程中既存在控制问题，也存在大量的管理问题。同时，设备一般分布在不同的区域，其中各工序、各设备同时并行地工作，基本相互独立，故全系统是比较复杂的。这种系统的特点是功能分散，用多台计算机分别执行不同的控制功能，既能进行控制又能实现管理。图 6－6 是一个四级计算机控制系统。其中过程控制级为最底层，对生产设备进行直接数字控制；车间管理级负责本车间各设备间的协调管理；工厂管理级负责全厂各车间生产协调，包括安排生产计划、备品备件等；企业(公司)管理级负责总的协调，安排总生产计划，进行企业(公司)经营方向的决策等。

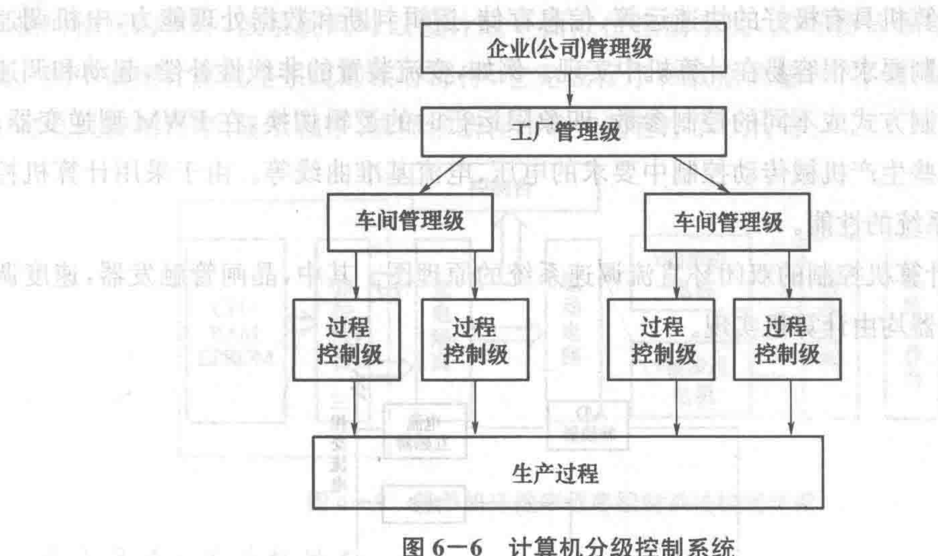


图 6－6　计算机分级控制系统

6.1.3　典型机电一体化控制系统

6.1.3.1　计算机过程控制系统

用计算机对温度、压力、流量、液面、速度等过程参数进行测量与控制的系统称为计算机过程控制系统。图 6－7 介绍了工业炉计算机控制的典型情况，其燃料为燃料油或者煤气，

为了保证燃料在炉膛内正常燃烧，必须保持燃料和空气的比值恒定。图中描述了燃料和空气的比值控制过程，它可以防止空气太多时，过剩空气带走大量热量；也可防止当空气太少时，由于燃料燃烧不完全而产生许多一氧化碳或炭黑。为了保持所需的炉温，将测得的炉温送入数字计算机计算，进而控制燃料和空气阀门的开度。为了保持炉膛压力恒定，避免在压力过低时从炉墙的缝隙处吸入大量过剩空气，或在压力过高时大量燃料通过缝隙逸出炉外，同时还采用了压力控制回路。测得的炉膛压力送入计算机，进而控制烟道出口挡板的开度。此外，为了提高炉子的热效率，还需对炉子排出的废气进行分析，一般是用氧化锆传感器测量烟气中的微量氧，通过计算而得出其热效率，并用以指导燃烧调节。

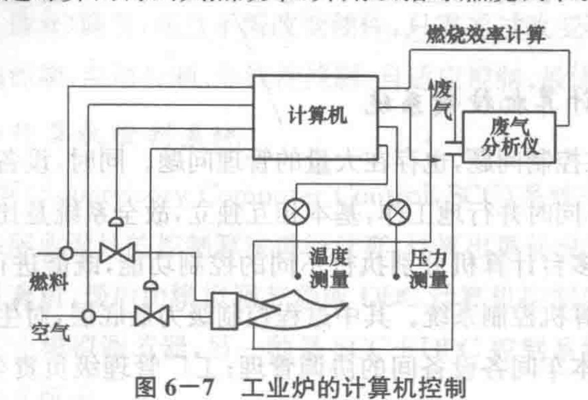


图 6—7 工业炉的计算机控制

6.1.3.2 微型计算机控制的电机调速系统

由于微型计算机具有极好的快速运算、信息存储、逻辑判断和数据处理能力，电机调速系统中的许多控制要求很容易在计算机中实现。例如，变流装置的非线性补偿，起动和调速时选用不同的控制方式或不同的控制参数，四象限运行时的逻辑切换，在 PWM 型逆变器、交一交变频或某些生产机械传动控制中要求的电压、电流基准曲线等。由于采用计算机控制，可大大提高系统的性能。

图 6—8 是计算机控制的双闭环直流调速系统的原理图。其中，晶闸管触发器，速度调节器和电流调节器均由计算机实现。

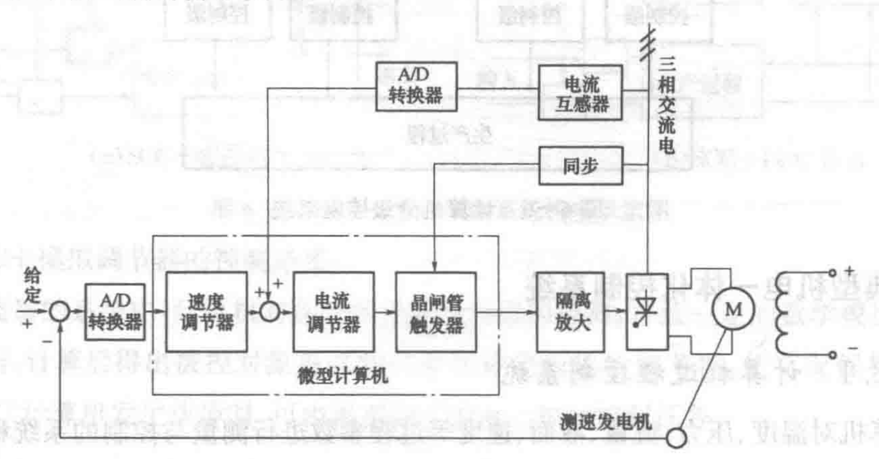


图 6—8 计算机控制的双闭环系统

6.1.3.3 计算机数字程序控制系统

采用计算机来实现顺序控制和数字程序控制是计算机在自动控制领域中应用的一个重要方面。它广泛地应用于机床控制、生产自动线控制、运输机械控制和交通管理等许多工业自动控制系统中。

顺序控制是使生产机械或生产过程按预先规定的时序(或现场输入条件等)而顺序动作的自动控制系统。目前这类系统中多采用微处理器构成的可编程序控制器(PC或PLC)。可编程序控制器使用方便,可靠性高,应用广泛。

数字程序控制系统是指能根据输入的指令和数据,控制生产机械按规定的工作顺序、运动轨迹、运动距离和运动速度等规律而自动完成工作的自动控制系统。数字程序控制系统(通常简称数控)一般用于机床控制系统中,这类机床称为数控机床。

目前数控系统多采用16位或32位工业控制微机系统或多微处理机系统控制。它按运动轨迹可以分为点位控制系统和轮廓(轨迹)控制系统。点位控制系统中,被控机构(如刀具)在移动中不进行加工,对运动轨迹没有具体要求,只要能准确定位即可,它适用于数控钻床、冲床等类机床的控制。轮廓控制系统中,被控机构按加工件的设计轮廓曲线连续地移动,并在移动中进行加工,最终将工件加工成所需的形状,它适用于数控铣床、车床、线切割机、绣花机等机床和生产机械的控制。

在图6—9中表示出一个在线、开环、实时的简单机床数字程序控制系统的构成框图。根据所使用的软件,该系统既可以设计成平面点位控制系统,又可设计成平面轮廓控制系统。图中微型计算机是系统的核心部件,它完成程序和数据的输入、存储、加工轨迹计算和步进电机控制程序、显示程序、故障诊断程序等控制程序的执行等。

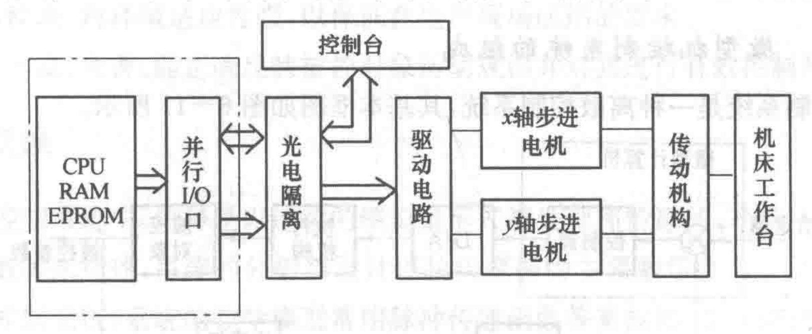


图6—9 简单机床数字程序控制系统构成框图

6.1.3.4 工业机器人

工业机器人是一种应用计算机进行控制的替代人进行工作的高度自动化系统,它主要由控制器、驱动器、夹持器、手臂和各种传感器组成。工业机器人计算机系统能够对力觉、触觉、视觉等外部反馈信息进行感知、理解、决策,并及时按要求驱动运动装置、语音系统完成相应任务。图6—10给出了智能机器人的一般结构,它是一个多级的计算机控制系统。可以这样说:没有计算机,就没有现代的工业机器人。

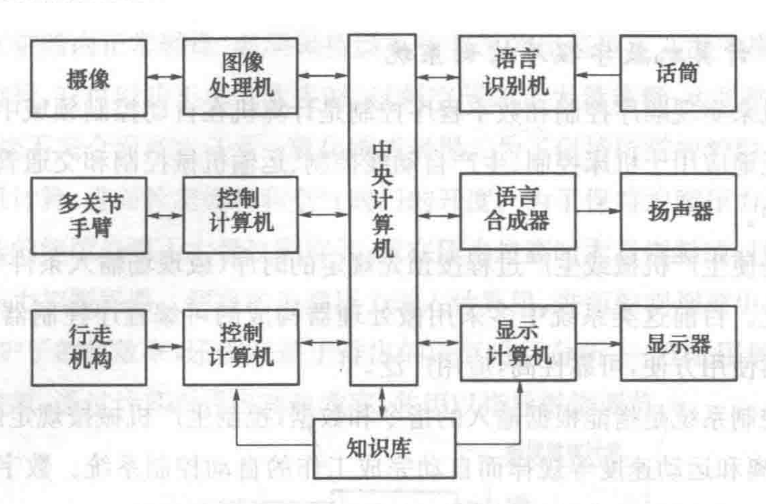


图 6－10　智能机器人的一般结构

6.2　微型机控制技术

由于数字信息处理技术和计算机技术的迅速发展，使得计算机，尤其是微型计算机（简称微型机）在工业控制领域中的应用越来越广泛，传统的模拟式信息处理和控制装置正逐步被数字计算机所取代。目前在机电一体化产品中，多数是以微型机为核心构成控制装置。因此，要进行机电一体化产品设计与开发，就必须了解和掌握微型机控制技术及其控制系统设计方法。

6.2.1　微型机控制系统的组成及特点

6.2.1.1　微型机控制系统的组成

微型机控制系统是一种离散控制系统，其基本框图如图 6－11 所示。

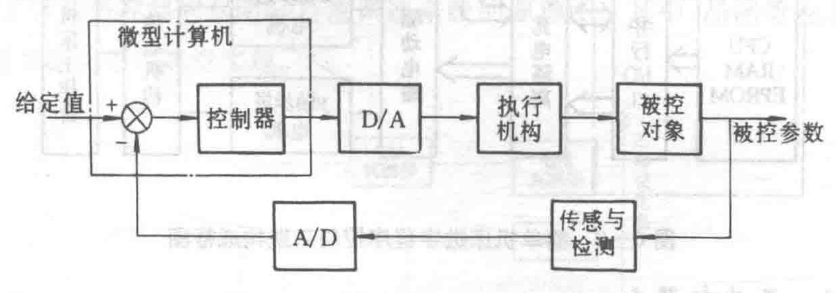


图 6－11　微型机控制系统基本框图

微型机控制系统还可看成是由硬件和软件两大部分组成的。硬件一般包括微型机、外围设备、输入/输出通道和操作台等，如图 6－12 所示。微型机与工业对象之间的输入/输出通道，包括数字量通道和模拟量通道，是微型机控制系统与其他微型机系统的主要区别之处。软件主要是指支持系统运行、并对系统进行管理和控制的程序系统，其中包括系统软件和应用软件。系统软件是指程序设计系统（指令系统、程序设计语言及相应的编辑、编译系

统等)、诊断程序、操作系统及与计算机密切相关的通用程序等,应用软件则是用户针对要解决的实际问题而开发的各种控制程序。

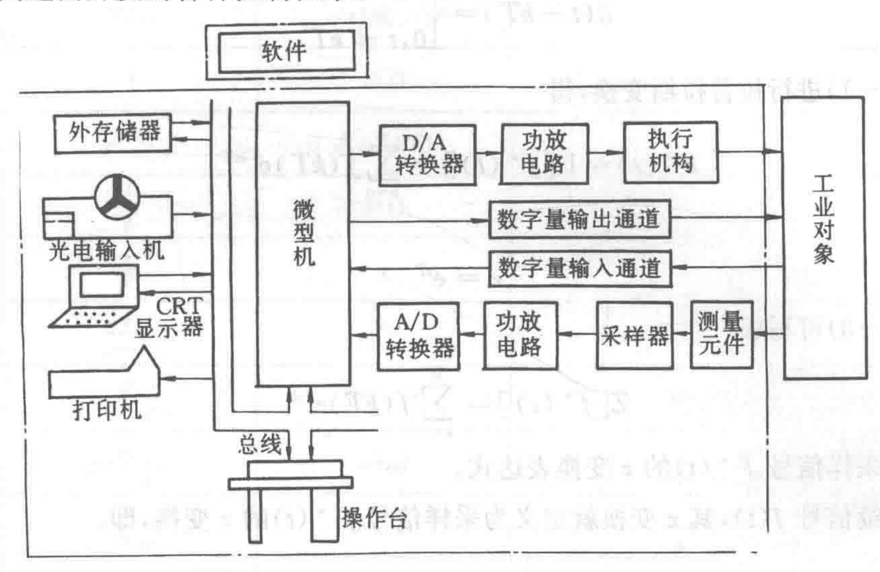


图 6—12　微型机控制系统的基本组成

6.2.1.2　微型机控制系统的特点

(1)具有完善的输入/输出通道,包括模拟量输入/输出通道和数字量或开关量输入/输出通道等,这是微型机有效地发挥其控制功能的重要保证。

(2)具有实时控制功能,换句话说,就是具有完善的中断系统、实时时钟及高速数据通道,以保证对被控对象状态及参数的变化以及一些紧急情况具有迅速响应的能力,并能够实时地在微型机与被控对象之间进行信息交换。

(3)可靠性高,对环境适应性强,以保证在生产现场应用的要求。

(4)具有丰富、完善、能正确反映被控对象运动规律并对其进行有效控制的软件系统。

6.2.2　z 变换

在连续控制系统中,信号是以连续的模拟量形式被处理和传递的,系统的数学模型常用拉氏传递函数等来描述,系统的分析与设计以拉氏变换为主要数学工具。微型机控制系统是一种离散控制系统,系统的数学模型常用脉冲传递函数等来描述,系统的分析与设计则以 z 变换为主要数学工具。因此,为了进行微型机控制系统设计,必须首先掌握 z 变换及脉冲传递函数等数学基础。

6.2.2.1　z 变换的意义

通过采样可把连续变化的模拟信号 $f(t)$ 转换成一连串离散的脉冲信号 $f^*(t)$。对于周期采样,若采样时间 τ 足够小,则由采样所获得的离散脉冲信号 $f^*(t)$ 可用下式表达:

$$f^*(t)=\sum_{k=0}^{\infty}f(kT)\delta(t-kT) \tag{6—1}$$

式中，T 是采样周期；$\delta(t-kT)$是在 $t=kT$ 时刻出现的单位脉冲函数，即

$$\delta(t-kT)=\begin{cases}1, t=kT\\0, t\neq kT\end{cases} \tag{6-2}$$

对式(6—1)进行拉普拉斯变换，得

$$F^{*}(s)=\mathrm{L}[f^{*}(t)]=\sum_{k=0}^{\infty}f(kT)\mathrm{e}^{-ksT} \tag{6-3}$$

令

$$z=\mathrm{e}^{sT} \tag{6-4}$$

则式(6—3)可写成

$$\mathrm{Z}[f^{*}(t)]=\sum_{k=0}^{\infty}f(kT)z^{-k} \tag{6-5}$$

这就是采样信号 $f^{*}(t)$的 z 变换表达式。

对于连续信号 $f(t)$，其 z 变换就定义为采样信号 $f^{*}(t)$的 z 变换，即

$$\begin{aligned}\mathrm{Z}[f(t)]=\mathrm{Z}[f^{*}(t)]=F(z)&=\sum_{k=0}^{\infty}f(kT)z^{-k}\\&=f(0)+f(T)z^{-1}+f(2T)z^{-2}+\cdots\end{aligned} \tag{6-6}$$

由此可见，连续信号 $f(t)$的 z 变换实质上就是离散信号 $f^{*}(t)$的拉氏变换，只不过在 $f^{*}(t)$的拉氏变换式中采用了式(6—4)的代换。通过这样的代换使得表达式更加简单，更加便于分析和计算。按照 z 变换的定义，连续信号 $f(t)$ 的 z 变换 $F(z)$可通过下述步骤来实现。

(1)以周期 T 对 $f(t)$采样，得到 $f^{*}(t)$。

(2)对 $f^{*}(t)$进行拉氏变换，得到 $F_{*}(s)$。

(3)将 $F_{*}(s)$中所包含的 e^{sT} 因子用 z 代换，则得到 $f(t)$的 z 变换 $F(z)$。

连续信号的 z 变换包括了采样过程，而且和采样周期 T 有关。应当指出，一个连续信号 $f(t)$取 z 变换后，只能表征该信号在各采样时刻 kT 上的特性(即信息)，而不能反映该信号在各采样时刻之间的特性，也就是说，$f(t)$的 z 变换只和采样信号 $f^{*}(t)$有一一对应的关系。

z 变换与拉普拉斯变换一样，也可以求反变换，即 z 反变换。通过 z 反变换，可以由 $F(z)$得出 $f^{*}(t)$，但却不能直接得出 $f(t)$。由 $f^{*}(t)$经过保持器后能否恢复原信号 $f(t)$，取决于在 z 变换过程中，香农采样定理是否得到了满足。

6.2.2.2 连续信号的 z 变换方法

1. 从连续时间信号求 z 变换

当连续信号以时间函数的形式给出时，可直接由 z 变换的定义来确定其 z 变换，也可采用查表的方法求取 z 变换。常见函数的 z 变换列于表 6—1。

表 6—1 z 变换表

	$X(s)$	$x(t)$或$x(k)$	$X(z)$
1	1	$\delta(t)$	1
2	e^{-kTs}	$\delta(t-kT)$	z^{-k}
3	$\frac{1}{s}$	$1(t)$	$\frac{z}{z-1}$
4	$\frac{1}{s^2}$	t	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
5	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}	$\frac{z}{z-e^{-aT}}$
6	$\frac{a}{s(s+a)}$	$1-e^{-at}$	$\frac{(1-e^{-aT})z}{(z-1)(z-e^{-aT})}$
7	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\sin\omega t$	$\frac{z\sin\omega T}{z^2-2z\cos\omega T+1}$
8	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\cos\omega t$	$\frac{z(z-\cos\omega T)}{z^2-2z\cos\omega T+1}$
9	$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}	$\frac{Tze^{-aT}}{(z-e^{-aT})^2}$
10	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-at}\sin\omega t$	$\frac{ze^{-aT}\sin\omega T}{z^2-2ze^{-aT}\cos\omega T+e^{-2aT}}$
11	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-at}\cos\omega t$	$\frac{z^2-ze^{-aT}\cos\omega T}{z^2-2ze^{-aT}\cos\omega T+e^{-2aT}}$
12	$\frac{2}{s^3}$	t^2	$\frac{T^2z(z+1)}{(z-1)^3}$
13		a^k	$\frac{z}{z-a}$
14		$a^k\cos k\pi$	$\frac{z}{z+a}$

2. 由拉普拉斯变换求 z 变换

当连续信号以拉普拉斯变换的形式给出时，可先将其反变换成时域信号，然后采用前面介绍的方法求得其 z 变换；也可先将其展开成简单的部分分式，然后用熟知的结果或查表求得其 z 变换。

6.2.2.3 z 变换的性质

z 变换具有和拉氏变换类似的一些性质或定理，它们可使问题的分析和求解变得更加简单。下面简要介绍其中的几个主要定理。

1. 线性定理

若 $f_1(t)$、$f_2(t)$的 z 变换为 $F_1(z)$、$F_2(z)$，且 $f(t)=af_1(t)+bf_2(t)$，则

$$F(z)=aF_1(z)+bF_2(z) \tag{6-7}$$

2. 滞后定理(延迟定理)

若 $Z[f(t)]=F(z)$，且 $t<0$ 时，$f(t)=0$，则

$$Z[f(t-mT)]=z^{-m}F(z) \tag{6-8}$$

式中，T 是采样周期；m 为一正整数。

滞后定理说明了 z^{-1} 与拉氏变换中的 e^{-sT} 的作用一样，表示纯滞后环节，滞后时间为一个采样周期 T。

3. 超前定理

若 $Z[f(t)]=F(z)$，则

$$Z[f(t+mT)]=z^m F(z)-z^m\sum_{k=0}^{m-1}f(kT)z^{-k} \tag{6-9}$$

若 $f(0)=f(T)=f(2T)=\cdots=f[(m-1)T]=0$，则

$$Z[f(t+mT)]=z^m F(z)$$

超前定理表明，算子 z 相当于使信号超前一个采样周期 T 的环节。

4. 初值定理

若 $f(t)$ 的 z 变换为 $F(z)$，且 $\lim\limits_{z\to\infty}F(z)$ 存在，则

$$f(0)=\lim_{z\to\infty}F(z) \tag{6-10}$$

5. 终值定理

若 $f(t)$ 的 z 变换为 $F(z)$，且 $f(kT)$ 具有固定的有限终值，则

$$\lim_{t\to\infty}f(t)=\lim_{k\to\infty}f(kT)=\lim_{z\to1}[(z-1)F(z)] \tag{6-11}$$

6.2.3 z 反变换

z 反变换是根据 z 变换函数 $F(z)$ 反求出原来的采样函数 $f^*(t)$ 或 $f(kT)$，记为

$$f(kT)=Z^{-1}[F(z)] \tag{6-12}$$

在微型机控制系统中，实际的控制过程都是在时域内进行的，控制算法及程序是按差分方程设计的。因此，在采用 z 变换方法对控制系统进行分析、求解并设计出合适的控制器后，还要通过 z 反变换的方法将 z 平面上的解转换回时域内，以得到一个脉冲序列或差分方程。

6.2.3.1 幂级数展开法

采用幂级数展开法求取 z 反变换时，首先将 z 变换函数展开成幂级数形式，然后根据 z 变换定义，幂级数中各项 z^{-k} 的系数就是在各采样时刻的原函数值 $f(kT)$。

6.2.3.2 部分分式法

当 z 变换函数 $F(z)$ 是有理分式时，可先将其分解成简单的部分分式之和，然后利用 z 变换定理及查表等方法获得其 z 反变换。

6.2.4 用 z 变换解差分方程

时域内离散系统的运动规律常用差分方程来描述，采用 z 变换的方法可使差分方程的

求解得到简化。用 z 变换解差分方程的实质是将差分方程变换成以 z 为变量的代数方程来求解。

6.2.5 z 传递函数

6.2.5.1 z 传递函数的定义

在输入和输出的初始条件均为零的情况下，一个环节或系统的输出脉冲序列(即输出采样信号) $y^*(t)$ 的 z 变换 $Y(z)$ 与输入脉冲序列(即输入采样信号) $x^*(t)$ 的 z 变换 $X(z)$ 之比，称为该环节或系统的 z 传递函数，又称脉冲传递函数。如用 $G(z)$ 来表示系统的 z 传递函数，则

$$G(z)=\frac{Z[y^*(t)]}{Z[x^*(t)]}=\frac{Y(z)}{X(z)} \tag{6-13}$$

z 传递函数可用来描述离散系统的结构和特性，是分析和设计微型机控制系统的一个重要工具。

6.2.5.2 z 传递函数的联接方式

与拉氏传递函数一样，z 传递函数也可用方框图表示，并且也具有串联、并联和反馈联接三种联接方式，如图 6—13 所示。在三种联接方式下，系统的 z 传递函数分别为：

串联 $$G(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=G_1(z)G_2(z) \tag{6-14}$$

并联 $$G(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=G_1(z)+G_2(z) \tag{6-15}$$

反馈联接 $$G(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=\frac{G_0(z)}{1+H(z)G_0(z)} \tag{6-16}$$

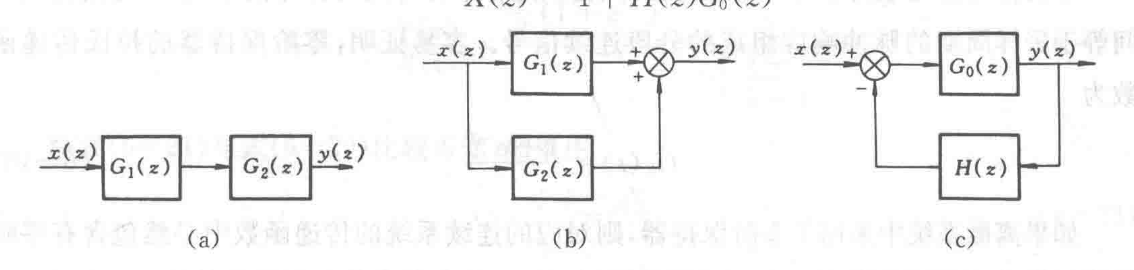


图 6—13 z 传递函数的联接方式

6.2.6 连续系统的离散化

在分析和设计微型机控制系统时，常先按连续系统建立其数学模型，选定控制器结构，采用连续系统的分析方法对系统结构和性能进行研究，然后再将连续系统转化成离散系统，以获得实际的控制算法并设计相应的控制程序。这是因为人们对于连续系统已经有了比较成熟的分析和设计方法，积累了丰富的经验。此外，在微型机控制系统中，被控对象是一个连续环节，而数字控制器却是一个离散环节，为了对整个系统采用统一的方法进行分析和研

究，也涉及连续系统与离散系统之间的转化问题。

下面介绍几种常用的连续系统离散化方法。

6.2.6.1 脉冲响应不变法

脉冲响应不变法是基于系统对单位脉冲信号的响应的拉氏变换或 z 变换在形式上与系统的拉氏传递函数或 z 传递函数一致这一性质的。

设某连续系统的拉氏传递函数为 $G(s)$，在单位脉冲信号 $\delta(t)$ 的作用下，其输出响应为 $y(t)$。由于 $L[\delta(t)]=1$，则

$$Y(s)=G(s)L[\delta(t)]=G(s)$$

类似地，若与 $G(s)$ 等效的系统 z 传递函数为 $G(z)$，系统的单位脉冲响应函数 $y(t)$ 的 z 变换为 $Y(z)$，由于 $Z[\delta(t)]=1$，则

$$Y(z)=G(z)Z[\delta(t)]=G(z)$$

$$G(z)=Y(z)=Z[y(t)]=Z[G(s)] \tag{6-17}$$

可见，连续系统拉氏传递函数的 z 变换就是等效的离散系统的 z 传递函数。

采用脉冲响应不变法对连续系统进行离散化的方法和步骤与由拉氏变换求 z 变换的方法和步骤是完全一样的，但其物理意义不同，后者是对一个信号进行 z 变换，而前者是将一个系统或环节进行离散化。

在采用脉冲信号或伪随机信号对系统进行测试实验时，所得到的是系统的脉冲响应函数，根据脉冲响应不变法的原理，可以很容易地辨识出系统的离散数学模型，即 z 传递函数。

6.2.6.2 零阶保持器法

零阶保持器是最简单的一种保持器，其输入是各采样时刻的脉冲信号，输出是由持续时间等于采样周期的脉冲响应组成的分段连续信号。容易证明，零阶保持器的拉氏传递函数为

$$G_h(s)=\frac{1-e^{-sT}}{s} \tag{6-18}$$

如果离散系统中采用了零阶保持器，则对应的连续系统的传递函数中必然包含有零阶保持器的传递函数，即

$$G(s)=G_h(s)G'(s)=\frac{1-e^{-sT}}{s}G'(s)$$

式中，$G'(s)$ 是系统中除去零阶保持器外的其他环节的传递函数。对 $G(s)$ 取 z 变换得

$$\begin{aligned} G(z)&=Z[G(s)]=Z\left[\frac{G'(s)}{s}-\frac{G'(s)}{s}e^{-sT}\right] \\ &=Z\left[\frac{G'(s)}{s}\right]-Z\left[\frac{G'(s)}{s}\right]z^{-1}=(1-z^{-1})Z\left[\frac{G'(s)}{s}\right] \end{aligned} \tag{6-19}$$

采用前面介绍过的各种 z 变换方法求出 $Z[G'(s)/s]$，就得到带有零阶保持器的连续系

统的 z 传递函数，从而实现连续系统的离散化。

6.2.6.3 双线性变换法

双线性变换法又称梯形积分法，是基于梯形法数值积分原理来实现连续系统离散化的。

设有一积分系统，其输入信号为 $x(t)$，则输出信号 $y(t)$ 及系统拉氏传递函数为

$$y(t)=\int_0^t x(t)\mathrm{d}t$$

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{1}{s} \tag{6-20}$$

若采用梯形法数值积分，取步长为 T，kT 时刻输入信号为 $x(kT)$，输出信号为 $y(kT)$，如图 6－14 所示，则可得差分方程：

$$y(kT)-y(kT-T)=\frac{T}{2}[x(kT)+x(kT-T)]$$

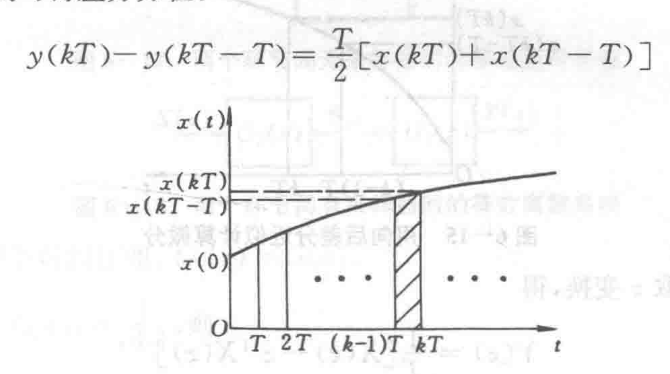


图 6－14 梯形法数值积分

对该差分方程取 z 变换，得

$$Y(z)-z^{-1}Y(z)=\frac{T}{2}[X(z)+z^{-1}X(z)]$$

$$G(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=\frac{\frac{T}{2}(1+z^{-1})}{1-z^{-1}}=\frac{1}{\frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} \tag{6-21}$$

将式(6－21)与式(6－20)比较可知，如果用

$$s=\frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \tag{6-22}$$

代入系统的拉氏传递函数表达式(6－20)，就可得到系统的 z 传递函数表达式(6－21)，从而实现连续系统的离散化。式(6－22)即双线性变换公式。

由于梯形法数值积分是一种近似积分，积分精度与选取的步长 T 有关，因此双线性变换也是一种近似变换，采样周期 T 取得越小，这种变换的精度(或叫保真度)越高。

6.2.6.4 微分方程的差分近似法

当连续系统的数学模型用微分方程描述时，可用各采样时刻采样值的差分来近似地代替微分，从而实现连续系统的离散化。

设有一一阶微分系统，输入信号为 $x(t)$，则系统的输出信号 $y(t)$ 和拉氏传递函数

$G(s)$为

$$y(t)=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$$

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=s \tag{6-23}$$

若采用一阶向后差分，取步长为 T，如图 6—15 所示，则在采样时刻 kT，系统的输出可近似地表达成

$$y(kT)=\frac{1}{T}[x(kT)-x(kT-T)]$$

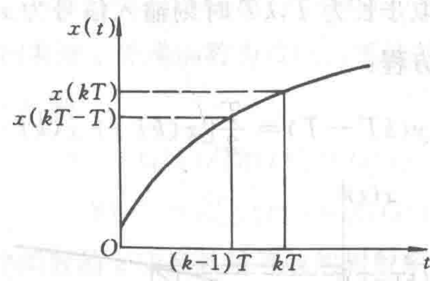


图 6—15 用向后差分近似计算微分

对该差分方程取 z 变换，得

$$Y(z)=\frac{1}{T}[X(z)-z^{-1}X(z)]$$

$$G(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=\frac{1}{T}(1-z^{-1}) \tag{6-24}$$

将式(6—24)与式(6—23)比较可知，如果用

$$s=\frac{1}{T}(1-z^{-1}) \tag{6-25}$$

代入式(6—23)，就可得到式(6—24)。式(6—25)就是采用向后差分的方法将连续系统转化成离散系统所用的变换公式。

采用同样的方法可求得用一阶向前差分来逼近一阶微分，并将连续系统转化成离散系统的变换公式为

$$s=\frac{1}{T}(z-1) \tag{6-26}$$

6.2.7 采样器对连续系统离散化的影响

在微型机控制系统中，连续变化的模拟信号需经采样保持器和 A/D 转换器变成微型机所能处理的离散数字信号。对于同样的连续系统，采样器的位置不同，其等效离散系统的 z 传递函数可能也不同。因此，在将连续系统离散化时，必须考虑采样器位置的影响。

图 6—16 所示为由两个环节串联组成的连续系统。当两个环节之间没有采样器时，经离散化后得到的离散系统结构如图 6—17 所示，其 z 传递函数为

$$G(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=G_1G_2(z)=Z[G_1(s)G_2(s)] \tag{6-27}$$

当在两个环节之间有采样器时，应将两个环节分别离散化后再进行联接，其等效离散系统结构如图 6－18 所示，z 传递函数为

$$G'(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=G_1(z)G_2(z)=Z[G_1(s)]Z[G_2(s)] \tag{6-28}$$

$X(s)$ → $G_1(s)$ → $G_2(s)$ → $Y(s)$

图 6－16 两个环节串联的连续系统

$X(z)$ → $G_1G_2(z)$ → $Y(z)$

图 6－17 两个环节间无采样器时的等效离散系统

$X(z)$ → $G_1(z)$ → S → $G_2(z)$ → $Y(z)$

图 6－18 两个环节间有采样器时的等效离散系统

通过下面的例子可以证明，$G'(z)\neq G(z)$。

设 $G_1(s)=\frac{1}{s}$，$G_2(s)=\frac{1}{s+1}$，则

$$G(z)=G_1G_2(z)=Z\left[\frac{1}{s(s+1)}\right]=Z\left[\frac{1}{s}\right]-Z\left[\frac{1}{s+1}\right]=$$

$$\frac{z}{z-1}-\frac{z}{z-e^{-T}}=\frac{z(1-e^{-T})}{(z-1)(z-e^{-T})}$$

$$G'(z)=G_1(z)G_2(z)=Z\left[\frac{1}{s}\right]Z\left[\frac{1}{s+1}\right]=$$

$$\left(\frac{z}{z-1}\right)\left(\frac{z}{z-e^{-T}}\right)=\frac{z^2}{(z-1)(z-e^{-T})}$$

显然，$G'(z)=G_1(z)G_2(z)\neq G_1G_2(z)=G(z)$，说明采样器位置不同，对连续系统离散化的影响也不同。

实际的微机控制系统多数为闭环系统，其中既有连续信号，又有采样信号，既有连续环节，又有离散环节，其典型结构如图 6－19 所示。图中，$D(z)$是数字控制器的 z 传递函数；$G_h(s)$、$G_0(s)$、$H(s)$分别是 D/A 转换器（实质上是一个零阶保持器）、被控对象、检测反馈装置的拉氏传递函数。按照该系统框图，可导出输出信号的 z 变换 $Y(z)$及闭环 z 传递函数 $W(z)$如下。

$$E(z)=X(z)-G_hG_0H(z)C(z)$$

$$C(z)=D(z)E(z)=D(z)[X(z)-G_hG_0H(z)C(z)]$$

$$C(z)=\frac{D(z)X(z)}{1+D(z)G_hG_0H(z)}$$

$$Y(z) = G_h G_0(z) C(z) = \frac{D(z) G_h G_0(z)}{1 + D(z) G_h G_0 H(z)} X(z) \tag{6-29}$$

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{D(z) G_h G_0(z)}{1 + D(z) G_h G_0 H(z)} \tag{6-30}$$

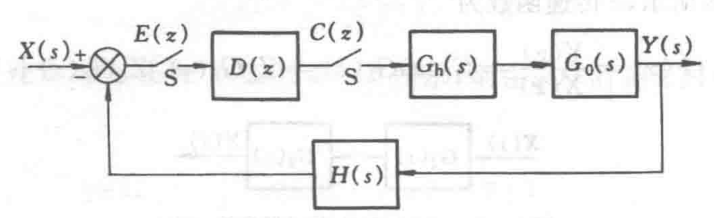


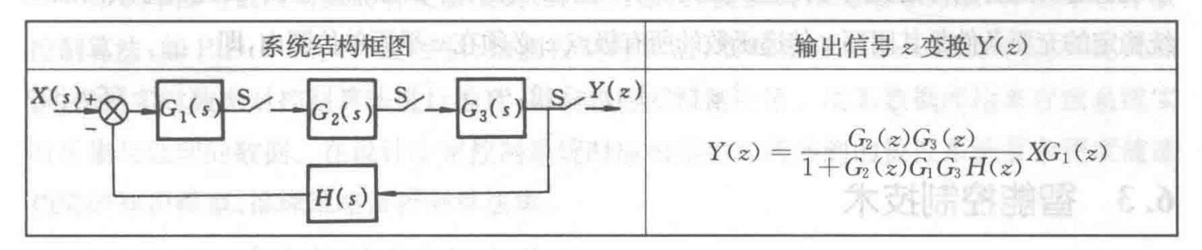
图 6—19　典型微型机控制系统框图

应当指出，由于采样器位置的影响，有些系统不能直接得到闭环 z 传递函数，但输出信号的 z 变换总是可以得到的。表 6—2 列出了常见闭环系统输出信号的 z 变换表达式，供设计和分析离散控制系统时参考。

表 6—2　常见闭环系统输出信号的 z 变换

系统结构框图	输出信号 z 变换 $Y(z)$
X(s), S, G(s), S, Y(z), H(s)	$Y(z) = \frac{G(z)}{1 + GH(z)} X(z)$
X(s), S, $G_1(s)$, S, $G_2(s)$, S, Y(z), H(s)	$Y(z) = \frac{G_1(z) G_2(z)}{1 + G_1(z) G_2 H(z)} X(z)$
X(s), S, G(s), S, Y(z), H(s)	$Y(z) = \frac{G(z)}{1 + G(z) H(z)} X(z)$
X(s), $G_1(s)$, S, $G_2(s)$, S, Y(z), H(s)	$Y(z) = \frac{G_2(z)}{1 + G_1 G_2 H(z)} X G_1(z)$
X(s), G(s), S, Y(z), H(s)	$Y(z) = \frac{1}{1 + GH(z)} X G(z)$

续表

系统结构框图	输出信号 z 变换 $Y(z)$
	$Y(z)=\dfrac{G_2(z)G_3(z)}{1+G_2(z)G_1G_3H(z)}XG_1(z)$

6.2.8 离散系统的稳定性条件

离散系统在时域内常用差分方程来描述。如果系统差分方程的解是收敛的，该系统就是稳定的，否则就是不稳定的。

与连续系统的稳定性判别方法类似，离散系统的稳定性也可用其 z 传递函数的特征来判别。由于 z 变换是拉氏变换的一种变形，因此离散系统在 z 平面上的稳定性条件可以由连续系统在 s 平面上的稳定性条件转化而来。

在式(6－4)中，取 $s=\sigma+\mathrm{j}\omega$，则有 $z=\mathrm{e}^{(\sigma+\mathrm{j}\omega)T}$。于是，算子 z 的模和相角分别为

$$|z|=\mathrm{e}^{\sigma T} \tag{6-31}$$

$$\varphi=\omega T \tag{6-32}$$

由以上两式可以得出 s 平面和 z 平面之间的映射关系，如图 6－20 所示。

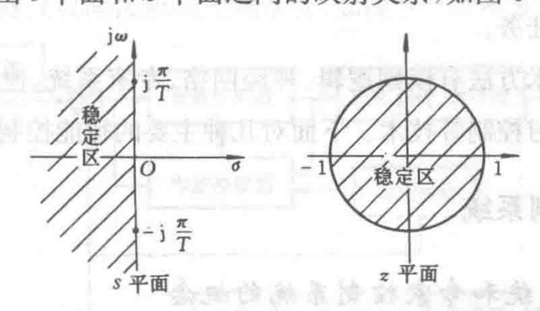


图 6－20　s 平面与 z 平面的映射关系

(1)当 $\sigma=0$ 时，$s=\mathrm{j}\omega$，对应于 s 平面上的虚轴，而 $z=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega T}$ 是 z 平面上半径为 1 的圆周(即单位圆)，也就是说，s 平面的虚轴在 z 平面上的映象是单位圆周。

(2)当 $\sigma<0$ 时，$s=\sigma+\mathrm{j}\omega$ 是虚轴左侧的整个 s 平面，而 $|z|=\mathrm{e}^{\sigma T}<1$ 是 z 平面上单位圆内的部分，即 s 平面虚轴左侧的部分在 z 平面上的映象为单位圆内的部分。

(3)当 $\sigma>0$ 时，$s=\sigma+\mathrm{j}\omega$ 是虚轴右侧的整个 s 平面，而 $|z|=\mathrm{e}^{\sigma T}>1$ 是 z 平面上单位圆外的部分，即 s 平面虚轴右侧的部分在 z 平面上的映象为单位圆外的部分。

(4)当某动点在 s 平面内从虚轴上的 $-\frac{\pi}{T}$ 点移动到 $\frac{\pi}{T}$ 点时，其映象在 z 平面内从 $\varphi=-\pi$ 点沿单位圆周逆时针转一圈移动到 $\varphi=\pi$ 点；当该动点在 s 平面内从虚轴上的 $-\infty$ 点移动到 $+\infty$ 点时，其映象在 z 平面内绕单位圆周逆时针走无穷多圈。

根据上述映射关系，就可从连续系统的稳定性条件得出离散系统的稳定性条件。线性连续

系统稳定的充要条件是其闭环传递函数的所有极点必须在 s 平面虚轴的左侧，因此其等效离散系统稳定的充要条件是其闭环 z 传递函数的所有极点 z_i 必须在 z 平面单位圆内，即

$$|z_i| < 1, i=1,2,\cdots,n \tag{6-33}$$

6.3 智能控制技术

所谓智能控制技术，是指机电一体化系统能够在无人干预的情况下自动实现控制目标的控制技术。对许多复杂的系统，难以建立有效的数学模型，因此难以用基于模型的常规控制理论去分析和设计控制器。为此人们提出使用类似于人的智慧和经验的知识来引导求解过程，即是一种基于知识的启发式解决问题的过程。这个过程能够使系统不断感知环境、获得信息以减小不确定性，进而增强计划、产生以及执行控制行为的能力。智能控制与传统的控制有密切的关系，又存在着本质的区别。与传统自动控制系统相比，智能控制系统具有运用人的控制策略、被控对象及环境的有关知识的能力，能以知识表示过程的非数学广义模型，能够采用开闭环控制和定性及定量控制结合的多模态控制方式，具有变结构特点，能够总体自寻优，具有自适应、自组织、自学习和自协调能力，有补偿及自修复能力和判断决策能力。总之，智能控制系统通过智能机自动地完成其目标的控制过程，可以在熟悉或不熟悉的环境中自动地完成控制任务。

智能控制的主要技术方法有模糊逻辑、神经网络、专家系统、遗传算法等理论和自适应控制、自组织控制、自学习控制等技术。下面对几种主要的智能控制系统作简要的介绍。

6.3.1 专家智能控制系统

6.3.1.1 专家系统和专家控制系统的概念

专家系统指模拟人类专家解决某一领域问题的计算机程序系统。专家系统一般由知识库、推理机、综合数据库、解释接口和知识获取五部分组成。将专家系统的理论和技术同控制理论和技术相结合，在未知环境下，仿效专家的经验，实现对被控对象的控制就形成了专家控制系统。

6.3.1.2 专家控制系统的结构

专家控制系统由知识库、算法库和人机接口等部分组成。其原理图如图 6—21 所示。

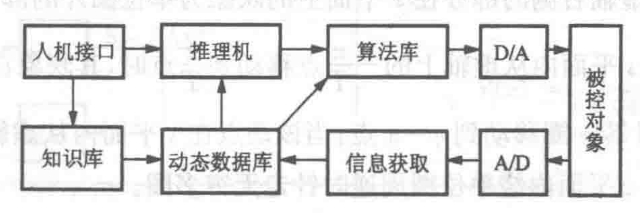


图 6—21 专家控制系统原理框图

知识库由与被控对象的有关事实集、经验数据、经验公式和规则等构成；算法库中存放控制算法，如 PID、Fuzzy、神经控制、预测控制等算法；实时推理机从知识库中选择有关知识，根据实时数据对控制算法进行推理，得出相应的控制决策。动态数据库用来存放系统实时采集与处理的数据。在设计专家控制系统时应根据生产所遇到的被控系统复杂程度建造相应的知识模型、推理策略及控制算法集。

6.3.1.3 专家控制系统的类型

根据专家控制在控制系统中的作用和功能，专家控制器可以分为以下两种类型。

1. 直接型专家控制器

这指基于知识的控制器直接影响被控对象的专家控制器，如图 6－22 所示。

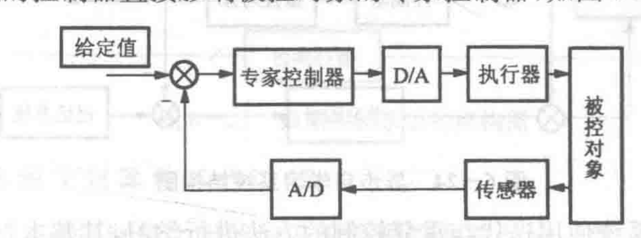


图 6－22 直接型专家控制器结构图

2. 间接型专家控制器

指基于知识的控制器仅仅间接影响控制系统，如图 6－23 所示。

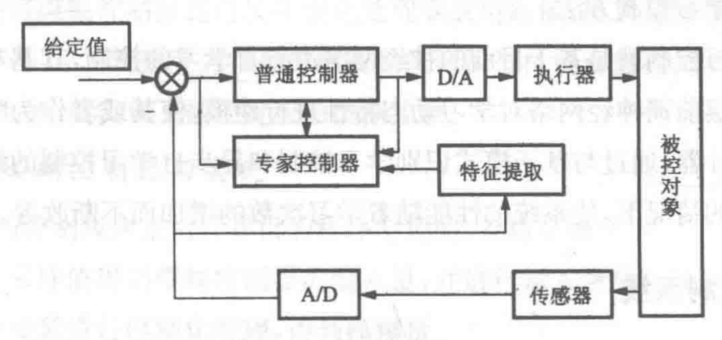


图 6－23 间接型专家控制器结构图

6.3.2 自学习智能控制系统

6.3.2.1 自学习与自学习控制系统的概念

自学习就是不具有外来校正的学习，或即不具惩罚和奖励的学习。

一个开放性系统，如果能够通过对环境与系统自身的学习获得经验，并在运用此经验于系统的控制之后，能够基于人机交互的性能评价器，使系统的某个预先要求的性能指标得到改善，则称此系统为学习控制系统；如果性能评价器在无人参与的情况下完全自动实现，则称此系统为自学习控制系统。

6.3.2.2 自学习控制系统的分类

1. 基于模式识别的学习控制

基于模式识别的学习控制包括三种方法，第一种是基于模式识别方法的双重控制的学习控制理论；第二种是把线性再励技术用于学习控制系统；第三种是基于 Bayes 学习估计的方法。

2. 异步自学习控制

异步自学习控制系统结构如图 6－24 所示。

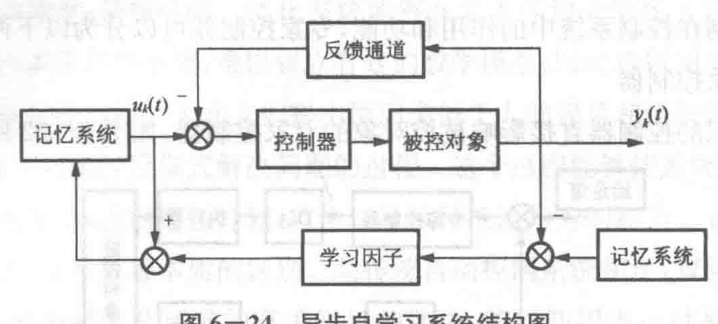


图 6－24 异步自学习系统结构图

异步自学习控制系统使用迭代与重复控制的方法进行学习，其基本过程是第 $k+1$ 次学习时的输入将基于第 k 次学习时的经验和输入获得，并且随着其中“有效”经验的不断积累而使实际输出经过“学习”逐渐逼近其期望输出。

3. 连接主义学习控制方法

连接主义学习控制就是基于目前的神经网络进行自学习的控制，其基本思想是：利用具有学习能力的多层前馈神经网络对学习动态特性进行建模，使其或者作为学习控制器，或者作为性能评价估计器，通过与基于模式识别学习控制和异步自学习控制的结合，从而能够在有人或无人监督的情况下，使系统的性能随着学习次数的增加而不断改善。

6.3.3 模糊控制系统

6.3.3.1 模糊控制系统概述

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种计算机控制技术。模糊控制的价值可从两方面来考虑：一方面，模糊控制提供一种实现基于规则的控制规律的新机理；另一方面，模糊控制为非线性控制器提出一个比较容易的设计方法，尤其是当受控对象含有不确定性而且很难用常规非线性控制理论处理时，更是有效。

6.3.3.2 模糊控制的基础知识

模糊理论是建立在模糊集合基础之上的，是描述和处理人类语言中所特有模糊信息的理论。它的主要概念包括模糊集合、隶属函数、模糊运算、模糊关系和模糊推理等。边界不很明确的同一类模糊事物的“集合”，称为“模糊集合”；集合中元素的取值范围称为论域；隶属函数是表示模糊集合中元素属于该模糊集合的程度。

6.3.3.3 模糊控制系统结构

模糊控制系统通常由模糊控制器、输入/输出接口、广义被控对象和测量装置四部分组成,如图 6—25 所示。

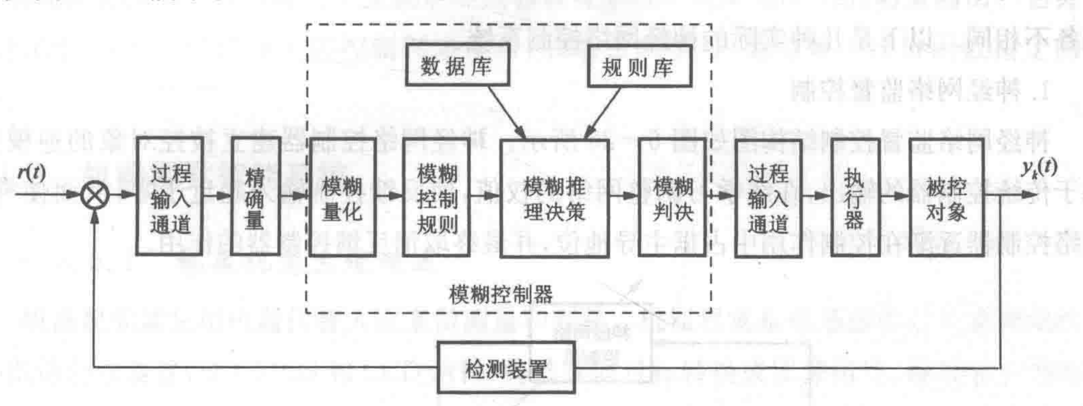


图 6—25 模糊控制系统的结构图

6.3.3.4 模糊控制器的工作过程

首先,把给定值与被控制量之间的偏差为模糊控制器的输入量,这是一个精确量,为了适合模糊控制,必须经过模糊化处理转化为模糊量,用相应的模糊子集表示。接着,根据输入的模糊量及模糊控制规则进行模糊决策,得到模糊控制量;由于实际被控对象的控制量是精确量,因此需要将模糊控制量进行反模糊化处理变成精确量;再经过输出量化处理得到实际输出值,最后经过 D/A 转换变为精确的模拟量送到执行机构对被控对象进行控制。这样周而复始地循环下去,就实现了被控过程的模糊控制。

6.3.3.5 模糊控制器的实现

模糊控制器的控制规律是由计算机的程序实现的,具体步骤如下:

(1)根据本次采样值得到模糊控制器的输入量,并进行输入量化处理。

(2)量化后的变量进行模糊化处理,得到模糊量。

(3)根据输入的模糊量及模糊控制规则,按模糊推理规则计算输出的模糊量。

(4)对得到的模糊输出量进行反模糊化处理,得到精确的控制量。

6.3.4 基于神经网络的智能控制系统

6.3.4.1 神经网络控制系统概述

神经网络具有很多适于控制的特性:神经网络可以处理难以用模型描述的系统;神经网络是分布式信息处理器,具有很强的容错性;神经网络是本质非线性系统,可实现任意非线性映射;神经网络具有很强的信息综合能力,能处理不同类型的输入,能很好解决信息之间的互补性和冗余性。因此,基于神经网络的控制系统,能够对不确定系统及扰动进行有效的控制,使控制系统达到所要求的动态、静态特性。

6.3.4.2 神经网络控制系统的结构类型

神经网络在控制系统中可以充当对象的模型、控制器、优化计算环节等。因此神经网络控制器的结构形式较多，对于不同结构的神经网络控制系统，神经网络在系统中的位置和功能各不相同。以下是几种实际的神经网络控制系统。

1. 神经网络监督控制

神经网络监督控制结构图如图 6－26 所示。神经网络控制器建立被控对象的逆模型，基于传统控制器的输出，在线学习调整网络的权值，使反馈控制输入趋近于零，从而使神经网络控制器逐渐在控制作用中占据主导地位，并最终取消反馈控制器的作用。

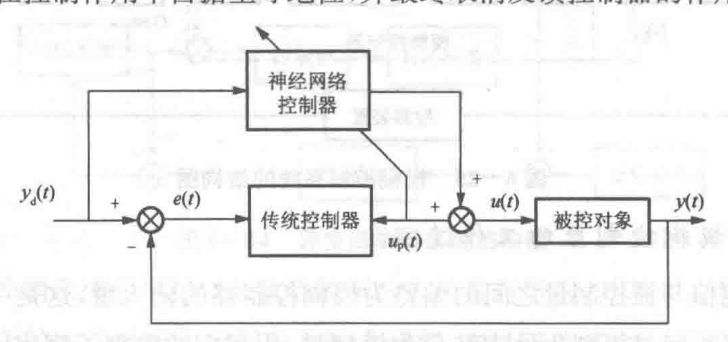


图 6－26　神经网络监督控制结构图

2. 神经网络直接逆控制

用评价函数 $E(t)$ 作为性能指标，调整神经网络控制器的权值。当性能指标为零时，神经网络控制器即为对象的逆模型。其结构如图 6－27 所示。

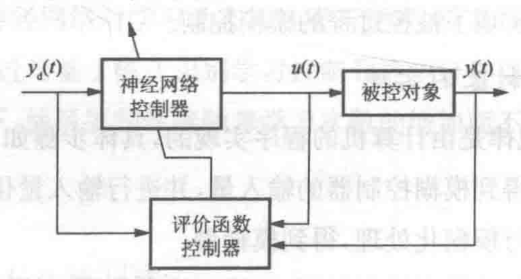


图 6－27　神经网络直接逆控制结构图

3. 神经网络自适应控制

根据系统正向或逆模型的输出结果来调节神经或传统控制器的内部参数，使系统满足给定的指标。其结构如图 6－28 所示。

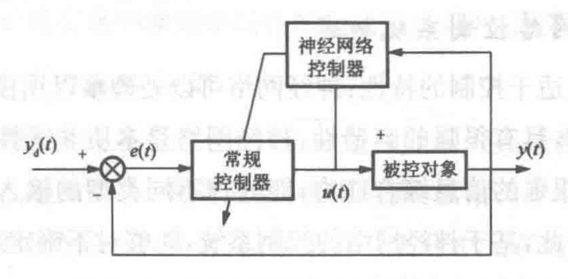


图 6－28　神经网络自适应控制结构图

6.3.4.3 神经网络控制的学习机制

神经网络控制器的学习就是寻找一种有效的途径进行网络连接权阵或网络结构的修改，从而使得网络控制器输出的控制信号能够保证系统输出跟随系统的期望输出。它分为监督式学习(有导师指导下的控制网络学习)和增强式学习(通过某一评价函数指定的学习)。

6.3.5 机器视觉智能系统

6.3.5.1 机器视觉系统概述

机器视觉就是用机器代替人眼来做测量和判断。机器视觉系统是指通过机器视觉产品(即图像获取装置，分CMOS和CCD两种)将被获取目标转换成图像信号，传送给专用的图像处理系统，根据像素分布和亮度、颜色等信息，转变成数字化信号；图像系统对这些信号进行各种运算来抽取目标的特征，进而根据判别的结果来控制现场的设备动作。机器视觉系统的目的就是给机器或自动生产线添加一套视觉系统，其原理是由计算机或图像处理器以及相关设备来模拟人的视觉行为，完成得到人的视觉系统所得到的信息。人的视觉系统是由眼球、神经系统及大脑的视觉中枢构成，计算机视觉系统则是由图像采集系统、图像处理系统及信息综合分析处理系统构成。

6.3.5.2 机器视觉系统构成

一个典型的工业机器视觉系统由照明光源、镜头、工业摄像机、图像采集/处理卡、图像处理系统和其他外部设备等组成。

6.3.5.3 机器视觉系统的特点

(1)非接触测量，对于观测者与被观测者都不会产生损伤，从而提高系统的可靠性。

(2)具有较宽的光谱范围，如使用人眼看不见的红外测量，扩展了人眼的视觉范围。

(3)长时间稳定工作，人类难以长时间对同一对象进行观察，而机器视觉则可以长时间地做测量、分析和识别任务。

机器视觉系统的应用领域越来越广泛。在工业、农业、国防、交通、医疗、金融，甚至体育、娱乐等行业都获得了广泛的应用，可以说已经深入到我们的生活、生产和工作的方方面面。

第7章 总体设计

7.1 概 述

机电一体化总体设计是应用系统总体技术，从整体目标出发，综合分析产品的性能要求及各机、电组成单元的特性，选择最合理的单元组合方案，实现机电一体化产品整体优化设计的过程。

随着大规模集成电路的出现，机电一体化产品得到了迅速普及和发展，从家用电器到生产设备，从办公自动化设备到军事装置，机与电紧密结合的程度都在迅速增加，形成了一个纵深而广阔的市场。市场竞争规律要求产品不仅具有高性能，而且要有低价格，这就给产品设计人员提出了越来越高的要求。另一方面，种类繁多、性能各异的集成电路、传感器和新材料等，给机电一体化产品设计人员提供了众多的可选方案，使设计工作具有更大的灵活性。如何充分利用这些条件，应用机电一体化技术，开发出满足市场需求的机电一体化产品，是机电一体化总体设计的重要任务。

7.1.1 总体设计的主要内容

一般来讲，机电一体化总体设计应包括下述一些主要内容。

7.1.1.1 **技术资料准备**

(1)搜集国内外有关技术资料，包括现有同类产品资料、相关的理论研究成果和先进技术资料等。通过对这些技术资料的分析比较，了解现有技术发展的水平和趋势。这是确定产品技术构成的主要依据。

(2)了解所设计产品的使用要求，包括功能、性能等方面的要求。此外，还应了解产品的极限工作环境、操作者的技术素质、用户的维修能力等方面的情况。使用要求是确定产品技术指标的主要依据。

(3)了解生产单位的设备条件、工艺手段、生产基础等，作为研究具体结构方案的重要依据，以保证缩短设计和制造周期、降低生产成本、提高产品质量。

7.1.1.2 **性能指标确定**

性能指标是满足使用要求的技术保证，主要应依据使用要求的具体项目来相应地确定，

当然也受到制造水平和能力的约束。性能指标主要包括以下几项。

(1)功能性指标:包括运动参数、动力参数、尺寸参数、品质指标等实现产品功能所必需的技术指标。

(2)经济性指标:包括成本指标、工艺性指标、标准化指标、美学指标等关系到产品能否进入市场并成为商品的技术指标。

(3)安全性指标:包括操作指标、自身保护指标和人员安全指标等保证产品在使用过程中不致因误操作或偶然故障而引起产品损坏或人身事故方面的技术指标。对于自动化程度较高的机电一体化产品,安全性指标尤为重要。

7.1.1.3　总体方案拟定

总体方案拟定是机电一体化总体设计的实质性内容,要求充分发挥机电一体化设计的灵活性,根据产品的市场需求及所掌握的资料和技术,拟定出综合性能最好的总体方案。总体方案拟定主要包括下述内容。

(1)性能指标分析。依据所掌握的技术资料及以往的设计经验,分析各项性能指标的重要性及实现的难易程度,从而找出设计难点及特征指标,即影响总体方案的主要因素。每项特征指标都由一系列的环节来实现和保证,如果实现某项特征指标的系列环节中存在着机械、电子等不同设计类型的环节,则需要采用机电一体化方法统筹选择各环节的结构,否则只需采用常规方法确定各环节结构即可。

(2)预选各环节结构。在性能指标分析的基础上,初步选出多种实现各环节功能和性能要求的可行的结构方案,并根据有关资料或与同类结构类比,定量地给出各结构方案对特征指标的影响程度或范围,必要时也可通过适当的实验来测定。将各环节结构方案进行适当组合,构成多个可行的总体结构方案,并使得各环节对特征指标的影响的总和不超过规定值。

(3)整体评价。选定一个或几个评价指标,对上述选出的多个可行方案进行单项校核或计算,求出各方案的评价指标值并进行比较和评价,从中选出最优者作为拟定的总体方案。

机电一体化总体设计的目的是设计出综合性能最优或较优的总体方案,作为进一步详细设计的纲领和依据。应当指出,总体方案的确定并非是一成不变的,在详细设计结束后,应再对整体性能指标进行复查,如发现问题,应及时修改总体方案,甚至在样机试制出来之后或在产品使用过程中,如发现总体方案存在问题,也应及时加以改进。

7.1.2　产品的使用要求与性能指标

产品的使用要求包括功能性要求、经济性要求和安全性要求等,产品的性能指标应根据这些要求及生产者的设计和制造能力、市场需求等来确定。

7.1.2.1　功能性要求

产品的功能性要求是要求产品在预定的寿命期间内有效地实现其预期的全部功能和性

能。从设计的角度来分析，功能性要求可用下列性能指标来表达。

1. 功能范围

任何产品所能实现的功能都有一定范围，例如一台通用性较强的打印机可以使用不同幅宽的打印纸及普通纸张，而微型打印机只能使用单一专用打印纸。一般来讲，产品的适用范围较窄，其结构可较简单，相应的开发周期较短，成本也较低，但由于适用范围窄，市场覆盖面就小，产品批量也小，使单台成本增加。相反地，如扩大适用范围，虽然产品结构趋于复杂，成本增加，但由于批量的增加又可以使单台成本趋于下降。

合理地确定产品的功能范围，不仅要考虑用户的使用要求，还要考虑对生产者在经济上的合理性，应综合分析市场环境、技术难度、生产企业的实力等多方面因素进行决策。在所有影响因素中，最关键、最难于准确获得的是市场需求与功能范围之间的关系。如果能准确获得这一关系，就不难采用优化的方法做出最优决策。上面的讨论是针对要进入市场的产品而言的，对于单件生产的专用机电一体化设备，则直接满足用户要求就可以了。

2. 精度指标

产品的精度是指产品实现其规定功能的准确程度，它是衡量产品质量的重要指标之一。精度指标需依据精度要求来确定，并作为产品设计的一个重要目标和用户选购产品的一个主要参考依据。产品在完成某一功能时所呈现的误差是参与实现这一功能的各组成环节误差的总和，而各环节的误差是由其工作原理及制造工艺所限定的。一般情况下，精度越高，成本也越高，成本上升将引起价格上升，销量下降。另一方面，精度降低可使成本和价格降低，导致产品销量增加，但在精度降低后，产品的使用范围将会随之缩小，又可能导致产品销量下降。因此，合理的精度指标确定是一个多变量优化问题，需要在确定了精度与成本、价格与销量两个基本函数关系后，才可进行优化计算，做出最优决策。

在进行专用机电一体化设备设计时，没有后一个函数关系，且精度指标受使用要求的约束而存在下限，因而不存在优化问题。

3. 可靠性指标

产品的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力。规定的条件包括工作条件、环境条件和储存条件；规定的时间是指产品使用寿命期或平均故障间隔时间；完成规定的功能是指不发生破坏性失效或性能指标下降性失效。

产品零、部件或元、器件的可靠性对整机可靠性的影响是“与”的关系，只有在全部零、部件或元、器件都有效时，整机才能有效，一个高可靠性的零、部件或元、器件不能补偿其他零、部件或元、器件的低可靠性。

可靠性指标对成本、价格和销量的影响与精度指标类似，因此也需要在确定了可靠性与成本、价格与销量两个基本函数关系后，才能对可靠性指标做出最优决策。应当指出，当由于产品可靠性的增高使得“规定的时间”超过产品市场寿命期（即产品更新换代周期）时，继

续提高可靠性是没有意义的。

4. 维修性指标

就当前的制造水平而言，在大多数情况下产品的平均故障间隔时间还都小于使用寿命期，还需要通过修理来保证产品的有效运行，以便在整个寿命期内完成其规定的功能。

维修可分为预防性维修和修复性维修。预防性维修是指当系统工作一定时间后，但尚未失效时所进行的检修；修复性维修是指产品在规定的工作期内因出现失效而进行的抢修。预防性维修所花的代价(如费用、时间等)一般小于修复性维修所花的代价。

在产品设计阶段充分考虑维修性要求，可以使产品的维修度明显增加，例如可把预计维修周期较短的局部或环节设计成易于查找故障、便于拆装等便于维修的结构。维修性指标一般不会增加成本，不受其他要求的影响，因此可按充分满足维修性要求来确定，并依据维修性指标来确定最合理的总体结构方案。

7.1.2.2 经济性要求

产品的经济性要求是指用户对获得具有所需功能和性能的产品所需付出的费用方面的要求。该费用包括购置费用和使用费用。用户总是希望这些费用越低越好。实际上，这些费用的降低不仅直接有益于用户，而且生产者也会因此在市场竞争中受益。

1. 购置费用

影响购置费用的最主要因素是生产成本，降低生产成本是降低购置费用的最主要途径。在降低生产成本这一点上，生产者与用户的利益是一致的，因此成本指标不像功能性指标那样存在最佳值，在满足功能性要求和安全性要求的前提下，成本越低越好。成本指标一般按价格和销量关系定出上限，作为衡量设计是否满足经济性要求的准则。

在设计阶段降低成本的主要方法有：①合理选择各零、部件和元、器件的工作原理和结构，注意避免“大材小用”“大马拉小车”的现象发生。②充分考虑产品的加工和装配工艺性，在不影响工作性能的前提下，尽可能简化结构，力求用最简单的机构或装置取代非必需的复杂机构或装置，去实现同样的预期功能和性能。③采用标准化、系列化和通用化的方法，缩短设计和制造周期，降低成本。④合理选用新技术、新结构、新材料、新元件和新器件等，以提高产品质量、性能和技术，从而降低成本。

2. 使用费用

使用费用包括运行费用和维修费用，这部分费用是在产品使用过程中体现出来的。在产品设计过程中，一般采取下述措施来降低使用费用：①提高产品的自动化程度，以提高生产率，减少管理费用及劳务开支等。②选用效率高的机构、功率电路或电器，以减少动力或燃料等的消耗。③合理确定维修周期，以降低维护费用。

7.1.2.3 安全性要求

安全性要求包括对人身安全的要求和对产品安全的要求。前者是指在产品运行过程

中，不因各种原因（如误操作等）而危及操作者或周围其他人员的人身安全；后者是指不因各种原因（如偶然故障等）而导致产品被损坏甚至永久性失效。安全性指标需根据产品的具体特点而定。

为保证人身安全常采取的措施有：①设置安全检测和防护装置，如数控机床的防护罩、互锁安全门、冲压设备的光电检测装置、工业机器人周围的安全栅等。②产品外表及壳罩等应倒角去毛刺，以防划伤操作人员。③在危险部位或区域设置警告性提示灯或安全标语等。④当控制装置和被控对象为分离式结构时，两者之间的电气连线应埋于地下或架在高空，并用钢管加以保护，以防导线绝缘层损坏而危及人身安全。

为保证产品安全常采取的措施有：①设置各种保护电器，如熔断器、热继电器等。②安装限位装置、故障报警装置和急停装置等。③采用状态检测及互锁等方法防止因误操作等所带来的危害。

7.2 性能指标分析

在产品的性能指标确定之后，设计工作的主要任务是选择和设计适当的结构来满足这些指标。机电一体化产品中某些性能指标的实现需要采用机械和电子两种技术及相应的机械和电子两类构成环节，因此在进行总体设计时，首先要对性能指标进行分析，将产品整体按功能分解成功能单元或子功能单元，以确定哪些功能单元采用机械技术实现，哪些采用电类技术实现，哪些必须采用机与电两种技术实现，并将性能指标合理分配到各功能单元，从而保证以最佳的结构方案实现产品的总体性能指标。

7.2.1 性能指标对设计方法的影响

性能指标除了可按使用要求划分为功能性指标、经济性指标和安全性指标三类外，还常从设计的角度划分为特征指标、优化指标和寻常指标三类。不同的性能指标，对产品总体设计的限定作用也不同。

特征指标是决定产品功能和基本性能的指标，是设计中必须设法达到的指标。特征指标可以是工作范围、运动参数、动力参数、精度等指标，也可以是整机的可靠性指标等。特征指标在优化设计中起约束条件的作用。

优化指标是在产品优化设计中用来进行方案对比的评价指标。优化指标一般不像特征指标那样要求必须严格达到，而是有一定范围和可以优化选择的余地。在设计中，优化指标往往不是直接通过设计保证的，而是间接得到的。常被选作优化指标的有生产成本、可靠度等。

寻常指标是产品设计中作为常规要求的一类指标，一般不定量描述。例如，工艺性指

标、人机接口指标(如宜人化操作等方面的要求)、美学指标、安全性指标、标准化指标等,通常都作为寻常指标。寻常指标一般不参与优化设计,只需采用常规设计方法来保证。

一般来讲,寻常指标有较为固定的范畴,而特征指标和优化指标的选定则应根据具体产品的设计要求来进行。一种产品设计中的特征指标,可能是另一种产品设计中的优化指标。某些指标在要求较为严格,必须经过周密设计才能达到时,应选为特征指标,而在要求较为宽松的情况下,则可选为优化指标。例如,在产品可靠性要求很高的情况下(如航空航天设备等),必须采用可靠性设计方法,把产品的可靠度作为特征指标进行设计,严格地限定所有零、部件和元、器件的失效率,才能保证产品的可靠性要求。但是,在可靠性无明显要求或要求较低、通常设计均可满足的情况下(如儿童玩具等),可将可靠度作为优化指标,在达到各特征指标要求的前提下,优化选择可靠度高的方案。又如在对旧机床进行数控改造时,由于旧机床精度因长期磨损已经很低,改造的目的是用它完成一些品种少、形状复杂但精度要求较低的零件加工,因此可将成本选为特征指标,即要求改造费用不能超过某一数额,而将精度作为优化指标,即在费用不超的条件下,尽量提高精度。

7.2.2 机电一体化优化设计的条件和方法

机电一体化设计比单一门类的设计有更多的可选择性和设计灵活性,因为某些功能既可以采用机械方案来实现,也可以采用电子硬件或软件方案来实现,如机械计时器可由电子计时器替代,汽车上的机械式点火机构可由微型机控制的电子点火系统替代,步进电机的硬件环形分配器可由软件环形分配器替代等。实际上,这些可以互相替代的机械、电子硬件或软件方案必然在某个层次上可实现相同的功能,因而称这些方案在实现某种功能上具有等效性,这种等效性是可以进行机电一体化设计的充分条件之一。

另外,从一般的控制系统方框图中可以看出,各个组成环节的特性是相互关联而且共同影响系统性能的。控制系统的机电一体化设计不是只改变控制装置的性能,而是把包括被控对象在内的大部分组成环节都作为可改变的设计内容,使设计工作比只改变控制装置有更大的灵活性,可以优化出更合理的结构组成形式,获得更理想的产品性能。这种机、电环节互相关联、相辅相成的互补特性,是机电一体化设计的另一充分条件。

如果在所设计的产品中具备等效性环节或互补性环节,那么该产品的设计就应该采用机电一体化设计方法,否则只需采用常规设计方法。

机械、电子硬件和软件技术都有各自的设计方法,这些方法遵循不同的原理,适应不同的工艺特点,不能彼此替代。在机电一体化产品中,除包含有机械和电子环节外,还可能具有涉及其他学科技术的环节,比如化学的、光学的环节等。对于这样涉及多种学科技术的机电一体化产品,难以获得一种通用的统一设计方法。目前,多采用多方案优化的方法来进行总体设计,即在满足约束条件(特征指标)的前提下,采用不同原理及不同品质的组成环节构

成多种可行方案，用优化指标对这些方案进行比较、优选，从而获得满足特征指标要求，且优化指标最合理的总体设计方案。可见，这种设计方法的关键是多种方案的列出，如果所列出的方案中不包括最优方案，则从中优选出的方案只能是较优的，而不可能是最优的。

在产品的组成方式及各组成环节的可选形式和品质等级范围均为已知的情况下，可采用组合筛选的方法列出可行方案，即先列出全部组合方案，方案的总数目可用组合排列的方法计算。例如，一个由三个环节组成的产品，每个环节有两种具体实现方式，每种方式又有两个品质等级，则总共可列出 64 种组合方案。然后用约束条件核对每一方案，去除不满足条件者，得到全部可行方案。应该指出，这里所说的"范围已知"是与设计者的知识范围有关的，人们无法提出自己不知道的方案。因此，列出可行方案这一步工作是创造性很强的工作，设计者应充分了解可能涉及的各学科领域的知识及其最新进展，正确地分析和考虑具体设计要求，创造性地综合出品质可能更为优异的新方案。

机电一体化优化设计往往要在机械技术、电子技术、软件技术等技术之间进行比较和权衡，但由于这几种技术的主要参量一般都具有不同的量纲，无法直接进行比较，因此在设计时，应首先找出它们的可比性，用具有相同量纲的优化指标（如成本、可靠度、相对精度等）对各方案进行比较。另外，当上述具有相同量纲的优化指标满足不了优化的需要时，应选择一部分参量进行变换，力求把不可比较的量转化成具有同一量纲的量，以便进行优化设计。

机电一体化优化设计通常需要采用多目标规划的方法，因为设计的基本目标是多性能、低价格，即包含了技术性和经济性两大类指标。多目标规划的求解策略有降维法、顺序单目标法和评价函数法等几种方法，这些方法的共同特点是，设法把多目标问题转化成单目标问题求解，但不同的转化方法对应着不同的求解策略。

降维法的基本思想是用一个起主要作用的指标作为目标函数，而将其他优化指标转化为约束条件，从而使多目标优化问题转化为单目标优化问题。

顺序单目标法的基本思想是，首先对各优化指标按重要程度排序，按单目标优化方法依序求出每个指标所对应的最优解，然后对这些单目标优化解进行折衷处理，从而得到整体最优解。

评价函数法的基本思想是，首先将各优化指标依一定关系进行组合，从而构造出一个单目标问题的目标函数，被称为评价函数，然后依据这个评价函数对各种方案进行评价，最终确定出最优方案。

在上述三种方法中，评价函数法虽然比较复杂，但其应用效果一般要优于前两种方法，因此，下面仅就这种方法进行较详细的介绍。

评价函数法的关键是合理地构造出一个能恰当地反映所研究问题的评价函数。工程上常用的评价函数构造方法有平方加权法、线性加权法、虚拟目标法等多种。不同的构造方法可得到不同的评价函数。在构造评价函数之前，需要先统一各指标的量纲。量纲的统一可

采用无量纲相对化方法，也可采用专家评分的方法。下面具体介绍用于构造评价函数的线性加权法及统一各指标量纲的无量纲相对化法。

设某个产品共有 m 个可行的方案，每个方案都选定 n 个评价指标；K_{ij} 为第 i 个方案中第 j 项评价指标值；$K_{\max j}$ 是第 j 项指标在各方案中的最大值；W_j 是第 j 项指标的加权值，它反映了这项指标在该产品中相对于其他各项指标的重要程度，且满足

$$\sum_{j=1}^{n} W_j = 1, 0 \leqslant W_j \leqslant 1 \tag{7-1}$$

则采用线性加权法所构造的第 i 个方案的综合评价指标（即评价函数）为

$$H_i = \sum_{j=1}^{n} W_j \frac{K_{ij}}{K_{\max j}}, i=1,2,\cdots,m \tag{7-2}$$

这就是该产品的评价函数表达式，其中通过 K_{ij} 与 $K_{\max j}$ 的比值实现了各评价指标的无量纲相对化。

采用优化方法求取式（7－2）的最大值，就可得到第 i 个方案的最佳评价函数值 $H_{i\max}$，即

$$\underset{K_{ij} \in D}{H_{i\max}} = \max_{K_{ij} \in D} \sum_{j=1}^{n} W_j \frac{K_{ij}}{K_{\max j}}, i=1,2,\cdots,m \tag{7-3}$$

式中，D 是由约束条件限定的指标集合。由于这里是以综合评价指标 H_i 最大为优化目标，所以如果某项优化指标 K_{ij} 期望取得较小的值，则应将其负值（即 $-K_{ij}$）代入式（7－3）。

为了评价出最佳方案，应采用优化方法依次求出各方案的最佳评价函数值 $H_{i\max}$，然后对它们进行比较，从中选出最佳方案，其对应的评价函数值为

$$H_{\max} = \max\{H_{i\max}, (i=1,2,\cdots,m)\} \tag{7-4}$$

下面举例说明上述方法的应用。

在设计某产品时，采用失效率、成本及模块化程度作为优化指标，其中失效率用各环节标准失效率的总和来表示，模块化程度用属于高度模块化的隶属度表示，成本以千元为单位。显然，失效率和成本应该越低越好，故在用式（7－2）构成评价函数时，失效率和成本应代入负值；而模块化程度是越高越好，在式（7－2）中应代入正值。各优化指标的权重系数 W_j 可按产品的实际使用要求确定，也可通过专家评分的方法确定。

表 7－1 列出了各项优化指标的权重系数 W_j，同时也列出了该产品的四种可行方案在满足特征指标约束的条件下按式（7－3）优化求得的最佳评价函数值 $H_{i\max}$ 及对应的最优解（即各优化指标的最佳取值）。例如，第一种方案的最佳评价函数值为

$$H_{1\max} = 0.5 \times \left(\frac{-120}{210}\right) + 0.3 \times \left(\frac{-7}{7}\right) + 0.2 \times \frac{0.5}{0.8} = -0.46$$

根据表 7－1 及式（7－4）可以容易地确定该产品的第二种方案是最佳方案，它所对应的最佳评价函数值是四种方案中的最大者，即－0.37。

表 7—1 评价函数及优化指标值

优化指标 K_{ij}	可行方案 i				权重系数 W_j
	1	2	3	4	
失效率 $K_{i1}/(10^{-6}h^{-1})$	120	170	180	210	0.5
成本 K_{i2}/千元	7	4	4	3	0.3
模块化程度 K_{i3}	0.5	0.8	0.7	0.5	0.2
评价函数 $H_{i\max}$	−0.46	−0.37	−0.42	−0.50	—

7.2.3 性能指标对产品结构的影响

一个特征指标由一系列具有一定功能的环节按一定关系连接起来加以实现。实现特征指标的环节构成方案可用功能框图的形式来表示，如图 7—1 所示。功能框图与分析控制系统时所用的传递函数框图是不同的。功能框图中只表示各功能之间的相互连接关系，并不表示各功能的某种参量的具体关系。功能框图只是作为进一步建立具体关系的参考，它可以用来分析各环节方案的等效性和互补性，表示各种结构方案的异同，并可作为对产品进行定性分析或粗略定量考察的工具。

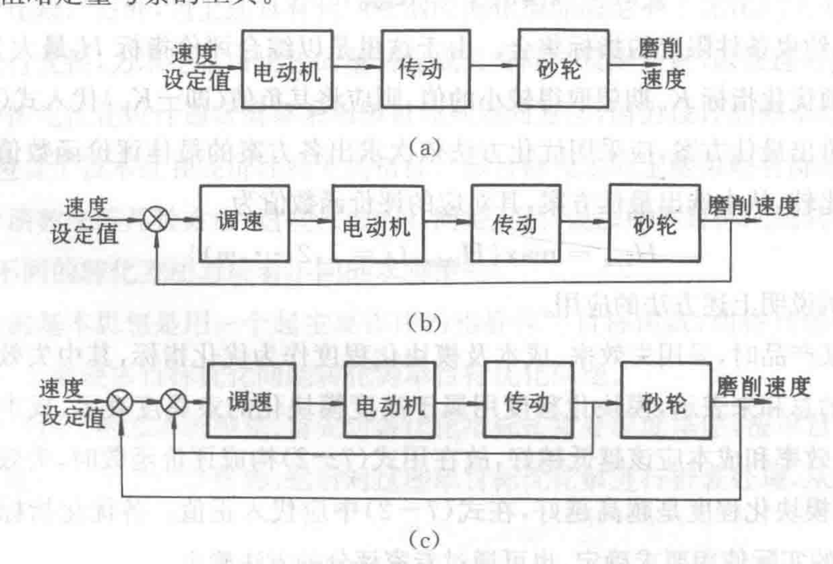


图 7—1 砂轮磨削速度控制的三种结构方案

下面结合图 7—1 所示的三种砂轮磨削速度的控制方案，来说明性能指标对系统结构方案的影响，或者说，如何根据性能指标去选择系统结构方案。

设特征指标为砂轮的磨削速度。砂轮磨削速度的稳定性是影响被加工零件表面质量分散程度的重要因素，不同用途的磨床，对砂轮磨削速度的稳定性有着不同的要求。根据磨削速度的三种不同品质等级，可设计出三种不同的结构方案，其功能框图分别如图 7—1(a)、(b)、(c)所示。

在图 7—1(a)所示结构方案中，砂轮转速不可调整，磨削速度的变化主要是由于砂轮磨

损导致直径改变而产生的，变化范围为30%。在图7—1(b)所示结构方案中，以砂轮直径为反馈量调整砂轮转速，磨削速度的变化主要是由电网电压波动、平带打滑、磨削力变化等原因而引起的，变化范围为4%左右。如果采用同步齿形带消除打滑，采用稳压器抑制电压波动，可使磨削速度的变化范围降至1%左右。也就是说，这一结构方案所对应的磨削速度变化范围为1%～4%。图7—1(c)在砂轮主轴上增加了转速反馈，可将磨削速度的变化范围控制在0.5%左右。

如果以磨削速度的变化范围为约束条件，以成本和可靠性为优化目标，来选择合理的结构方案，则可有下面几种结果。

(1)当磨削速度变化范围要求可大于30%时，三种结构方案都是可行的，但按优化指标进行评价，可确定图7—1(a)所示结构方案最佳，因为该方案结构简单，所以成本低、可靠性好。

(2)当磨削速度变化范围要求不大于30%时，后两种方案都是可行的，优化结果为图7—1(b)所示方案较好。由于该方案具有机电互补性，因而还应进一步进行子功能分配、性能指标分配等定量优化工作。经过定量优化可得出该方案的变形方案，即采用手动开环调整砂轮转速的方案，这样可简化结构、降低成本、提高可靠性。

(3)当磨削速度变化范围要求不大于5%时，则后两种方案也都是可行的，优化结果是两种方案的综合评价指标值相差不多，因此还应增加优化指标，进行进一步的定量优化，以便做出最后的决策。

(4)当磨削速度变化范围要求不大于1%时，则只有第三种方案可行，但为获得该方案的具体结构实现方案，还应作进一步的定量优化。

由上述讨论可以看出，特征指标对产品的总体结构有限定作用，即限制了可采用结构的范围；优化指标及权重系数则是在特征指标所限定的范围内，作为方案选择的依据，它们直接影响着结构方案的确定。因此，在总体设计阶段，特征指标、优化指标及权重系数的选择和量化是确定总体结构方案的关键，应给予充分的重视，确保其合理性和正确性。

7.3　功能及性能指标的分配

经过对性能指标的分析，得到了实现特征指标的总体结构初步方案。对于初步方案中具有互补性的环节，还需要进一步统筹分配机与电的具体设计指标，对于具有等效性的环节，还需要进一步确定其具体的实现形式。在完成这些工作后，各环节才可采用常规方法进行详细设计。

7.3.1　功能分配

具有等效性的功能可有多种具体实现形式，在进行功能分配时，应首先把这些形式尽可

能地全部列出来。用这些具体实现形式可构成不同的结构方案，其中也包括多种形式的组合方案。采用适当的优化指标对这些方案进行比较，可从中选出最优或较优的方案。优化过程只需计算与优化指标有关的变量，不必等各方案的详细设计完成后再进行。下面以某定量秤重装置中滤除从安装基础传来的振动干扰的滤波功能的分配为例，说明等效功能的分配方法。

图 7—2 是该装置的初步结构方案，其中符号“Δ”表示装置中可建立滤波功能的位置。从安装基础传来的振动干扰经装置基座影响传感器的输出信号，该信号再经放大器、A/D 转换器送至控制器，使控制器的控制量计算受到干扰，因而使所秤量产生误差。为保证秤量精度，必须采用滤波器来滤除这一干扰的影响。

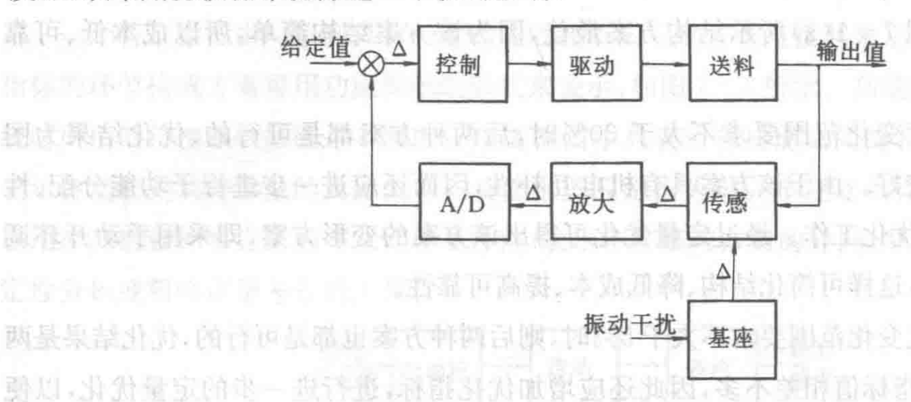


图 7—2　定量秤重装置功能框图

经过分析可知，可以采用三种滤波器来实现这一滤波功能，即安装在基座处的机械滤波器（又称阻尼器）、置于放大环节的模拟滤波器和以软件形式放在控制环节的数字滤波器。这三种滤波器在实现滤波功能这一点上具有等效性，但它们并不是完全等价的，在滤波质量、结构复杂程度、成本等方面它们具有不同的特点和效果。因此，必须根据具体情况从中择优选择一种最合适的方案。

通过对定量秤重装置的工作环境和性能要求进行分析，可归纳出选择滤波方案的具体条件为：在存在最低频率为 ω_1、振幅为 h_1 的主要振动干扰的条件下，保证实现以 T 为工作节拍、精度为 K 的秤量工作，并且成本要低。因此，可选择成本作为该问题的优化指标，对主要振动干扰的衰减率 α_1 和闭环回路中所允许的时间滞后 T_c 作为特征指标，其中衰减率 α_1 可根据干扰信号振幅 h_1 和要求的秤量精度 K 计算得出，允许的滞后时间 T_c 可根据工作节拍 T 和秤量精度 K 计算得出。详细计算方法这里不进行讨论。

滤波器放在不同位置，对系统的动态特性会产生不同的影响。从图 7—2 中可以看出，由基座形成的干扰通道不在闭环控制回路内，因此，如在这里安装机械滤波器，其衰减率及相位移不会影响闭环控制回路的控制性能，也就是说，不受特征指标的约束，不需要考虑相位特性，因而衰减率可以设计得足够大，容易满足特征指标 α_1 的要求。但是由于干扰信号的最低频率 ω_1 较低，机械式滤波器的结构较复杂，体积较大，因而成本也较高。

模拟式滤波器可以与放大器设计在一起，也可单独置于放大环节之后，但不论放在哪一位置，都是在闭环回路内。由于 ω_1 是干扰信号的低端频率，所以这里应采用低通滤波器。由低通滤波器的特性可知，当在控制回路内串入低通滤波器后，将使控制系统的阶跃响应时间增加，相位滞后增大，快速响应性能降低。因此，模拟滤波器性能的选择受特征指标 T_c 的约束，不能采用高阶低通滤波器，而低阶低通滤波器的滤波效果又较差。

数字滤波器的算法种类较多，本例采用算术平均值法来实现低通滤波。同模拟滤波器一样，由于数字滤波器需要计算时间，因此也受允许的滞后时间 T_c 的限制，且对较低频率的干扰信号，抑制能力较弱，但数字滤波器容易实现，且成本较低。

通过上述分析可见，三种滤波器各有特点，因此需要采用优化方法合理分配滤波功能，以得到最优方案。为了讨论问题方便，这里只选成本作为优化指标，将特征指标作为约束条件，构成单目标优化问题。由于方案优化是离散形式的，故采用列表法较为方便、直观。具体做法是：首先根据滤波器的设计计算方法，求出各种实现形式在满足约束条件下的一定范围内的有关性能，将这些性能列成表格，按表选择可行方案，然后再对各可行方案进行比较，根据优化指标选择出最优方案。

表 7－2 列出了上述三种滤波器的特征指标和优化指标值，其中 A、B、C、D 是四个不同的品质等级；T_c/T_1 是允许的滞后时间与频率为 ω_1 的干扰信号周期之比。由于机械滤波器所在位置不影响系统动态特性，故表中相应位置没有列出这项指标。

表 7－2　滤波器特性

滤波形式	项目	A	B	C	D
机械滤波器	衰减率/dB	－20	－30	－35	－40
	T_c/T_1	—	—	—	—
	成本/元	100	200	300	500
模拟滤波器	衰减率/dB	－5	－10	－15	－20
	T_c/T_1	1.47	3	5.5	10
	成本/元	20	20	20	20
数字滤波器	衰减率/dB	－12	－17	－20	－22
	T_c/T_1	1.5	2.5	3.5	4.5
	成本/元	10	10	10	10

由表7－2 可见，当干扰信号周期 T_1 大于允许的滞后时间 T_c 时，即 $T_c/T_1<1$ 时，模拟滤波器和数字滤波器都不能满足系统动态特性的要求，这时只能选择机械滤波器。

现假设约束条件为 $T_c/T_1\leqslant 5.5$，$\alpha_1\leqslant -40$dB。由表 7－2 可见，单个模拟滤波器和单个数字滤波器都无法满足该约束条件，因此必须将滤波器组合起来（即由几个滤波器共同实现滤波功能）才能构成可行方案。

从表 7－2 中选出满足约束条件的可行方案列于表 7－3，其中总特征指标值为构成可行

方案的各滤波器的相应特征指标值之和。依据成本这一优化指标，可从表 7—3 所列出的四种可行方案中选出最合理的方案，即方案 3。该方案采用机械滤波器和数字滤波器分别实现对干扰信号的衰减，衰减率均为－20dB，也就是说，将滤波功能平均分配给机械滤波器和数字滤波器，同时还满足另一约束条件 $T_c/T_1=3.5<5.5$，而且该方案成本最低。

表 7—3 滤波方案

可行方案	机械滤波器	模拟滤波器	数字滤波器	总衰减率 dB	总 T_c/T_1	总成本/元
1	D			－40	—	500
2	A	A	B	－42	3.97	130
3	A		C	－40	3.5	110
4	B	B		－40	3	220

应当指出，表 7—3 中并未将所有可行方案列出，因此，方案 3 并不一定是所有可行方案中的最优方案。此外，当约束条件改变时，将会得到不同的可行方案组及相应的最优方案。

7.3.2 性能指标分配

在总体方案中一般都有多个环节对同一性能指标产生影响，即这些环节对于实现该性能指标具有互补性。合理地限定这些环节对总体性能指标的影响程度，是性能指标分配的目的。

在进行性能指标分配时，首先要把各互补环节对性能指标可能产生的影响作用范围逐一列出，对于不可比较的变量应先变换成相同量纲的变量，以便优化处理。所列出的影响作用范围应包括各环节不同实现形式的影响作用范围，它们可以是连续的，也可以是分段的或离散的。在满足约束条件的前提下，采用不同的分配方法将性能指标分配给各互补环节，构成多个可行方案。然后进一步选择适当的优化指标，对这些可行方案进行评价，从中选出最优的方案。下面以车床刀架进给系统的进给精度分配为例，说明性能指标的分配方法。

图 7—3 是开环控制的某车床刀架进给系统的功能框图。由图可见，该系统由数控装置、驱动电路、步进电动机、减速器、丝杠螺母机构和刀架等环节组成。现在的问题是要对各组成环节进行精度指标的分配。设计的约束条件是刀架运动的两个特征指标，即最大走刀速度 $v_{max}=14$mm/s，最大定位误差 $\delta=16\mu$m。由于这里只作精度分配，没有不同的结构实现形式，可靠性的差别不显著，因此只选择成本作为优化指标，构成单目标优化问题。

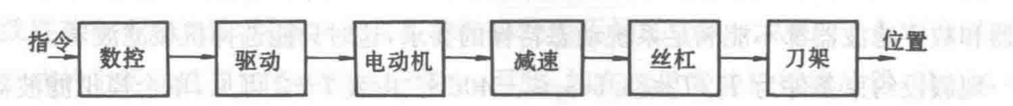


图 7—3 开环控制车床刀架功能框图

首先分析各组成环节误差产生的原因、误差范围及各精度等级的生产成本。产生误差的环节及原因如下。

(1)刀架环节。为减少建立可行方案及优化计算的工作量,可将一些环节合并,并用等效的综合结果来表达。因此,这里将床身各部分的影响也都列在刀架一个环节内,将刀架相对主轴轴线的径向位置误差作为定位误差。经分析可知,床身各部分影响定位误差的主要因素是床鞍在水平面内移动的直线度,其精度值与相应的生产成本见表7—4。

(2)丝杠环节。丝杠螺母副的传动精度直接影响刀架的位置误差,它有两种可选择的结构形式,即普通滑动丝杠和滚动丝杠,分别对应着不同的精度等级。如果假定丝杠螺母副的传动间隙已通过间隙消除机构加以消除,则传动误差是影响位置误差的主要因素,其具体数值及对应成本列于表7—4,其中A、B两个精度等级对应着滚动丝杠,C、D两个精度等级对应着滑动丝杠。

表7—4 各组成环节误差及对应成本

组成环节	指标	A	B	C	D
刀架	床鞍移动直线度/μm	4	6	8	10
	成本/千元	10	5	2	1
丝杠螺母副	传动误差/μm	0.5	1	2	4
	成本/千元	5	3	2	1.2
减速器	齿轮传动误差/μm	1	1.2	2	2.5
	成本/千元	0.6	0.6	0.3	0.3
控制环节	最小脉冲当量/μm	3	7	—	—
	成本/千元	3	2	—	—

(3)减速器环节。该环节误差主要来自齿轮的传动误差,齿侧间隙产生的误差应采用间隙消除机构加以消除。床鞍移动误差和丝杠传动误差的方向与量纲和定位误差相同,不需要进行量纲转换,但齿轮的传动误差则需依据初步确定的参数,如丝杠导程、齿轮直径、传动比等,转换成与定位误差有相同方向和量纲的等效误差。考虑到两种可能的传动比和两个可能的齿轮精度等级,共得到四个品质等级的等效误差和相应的成本,并列于表7—4中。

(4)数控环节。这个环节里包括了数控装置、驱动电路和步进电动机。步进电动机在不同载荷作用下,其转子的实际位置对理论位置的偏移角也不同,在不失步正常运行的情况下,该偏移角不超过±0.5个步距角。此外,虽然数控装置的运算精度可达到很高,但由于步进电动机的控制指令是以脉冲为单位的,因此数控装置仍会产生±0.5个步距角的舍入误差。这样,数控环节可能产生的总误差为±1个步距角,且应将步距角转换成刀架运动方向上的脉冲当量。由于最大走刀速度 v_{max} 限制了脉冲当量的下限,因此通常可用最大走刀速度除以步进电动机的最高运行频率来求取最小脉冲当量,并作为精度指标分配的参考值,而不用还没有最后确定的传动链参数来计算脉冲当量。表7—4中列出的数控环节最小脉冲当量是根据选定的两种具有不同最高运行频率的步进电动机、按上述方法计算得出的。

根据表7—4,可以找出若干满足最大定位误差要求的可行方案。部分可行方案列于表

7—5,其中总成本一栏是各可行方案的优化指标值。若有多个优化指标,可按式(7—2)或式(7—3)求出综合指标值(即评价函数值)列入该栏。

表 7—5 精度分配方案

可行方案	刀架环节	丝杠环节	减速器环节	数控环节	总定位误差/μm	总成本/元
1	B	B	C	B	16	10.3
2	C	D	A	A	16	6.8
3	D	C	A	A	16	6.6
4	C	C	C	A	15	7.3
5	B	C	A	B	16	9.6

由表 7—5 可以看出,第 3 个方案的成本最低,因此是表中所列五个可行方案中的最优方案(由于表 7—5 中并未列出全部可行方案,因此第 3 个方案实际上也可能是一种较优方案)。该方案的具体实现形式是:采用高频步进电动机驱动,较高精度等级的齿轮和高精度的滑动丝杠传动,较低精度的床身导轨支承和导向。选定该方案后,它对各组成环节的精度要求也就自然成为各环节进一步详细设计的精度指标。

参考文献

[1]陈荷娟. 机电一体化系统设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.

[2]戴夫德斯·谢蒂(Devdas Shetty),理查德 A·科尔克(RichardA. kolk). 机电一体化系统设计(原书第2版)[M]. 北京:机械工业出版社,2016.

[3]冯浩,汪建新,赵书尚,杨威. 机电一体化系统设计(第二版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2016.

[4]韩红. 机电一体化系统设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.

[5]何立民. 单片机应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[6]何振俊. 机电一体化系统项目教程[M]. 北京:电子工业出版社,2014.

[7]姜培刚,盖玉先. 机电一体化系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

[8]吕俊芳. 传感器与检测仪器电路[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[9]戚长政. 自动机与自动线(第2版)[M]. 北京:科学出版社,2012.

[10]芮延年. 机电一体化系统设计[M]. 苏州:苏州大学出版社,2017.

[11]舒志兵. 机电一体化系统应用案例精解[M]. 北京:中国电力出版社有限公司,2011.

[12]孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社,2011.

[13]王纪坤,李学哲. 机电一体化系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2013.

[14]王细洋. 机床数控技术[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

[15]王先逵,艾兴,王爱玲. 机床数字控制技术手册——操作与应用卷[M]. 北京:国防工业出版社,2013.

[16]谢存禧,张铁. 机器人技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[17]尹志强等. 系统设计课程设计指导书(机电一体化)[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

[18]于爱兵,马廉洁,李雪梅. 机电一体化概论[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

[19]俞竹青. 机电一体化系统设计[M]. 北京:电子工业出版社,2011.

[20]张华光. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[21]张建民. 机电一体化系统设计(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2014.

[22]张秋菊,王金娥,訾斌. 机电一体化系统设计[M]. 北京:科学出版社,2016.

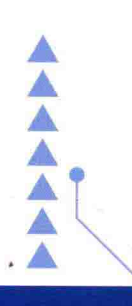
[23]张伟林,李永际. 自动机生产线控制技术实训[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

[24]郑堤,唐可洪. 机电一体化设计基础[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

[25]訾斌. 混合驱动柔索并联机器人力学分析与跟踪控制技术[M]. 北京:科学出版社,2013.

策划编辑 罗 雅
责任编辑 罗国良
封面设计 墨创文化 M.C CULTURE

机电一体化
系统设计







定价: 38.00元

[General Information]
书名=a
SS号=14444349